



Mariana Nunes Maleiro dos Santos
Licenciatura em Ciências de Engenharia Biomédica

Desenvolvimento de um Pupilómetro de Baixo Custo

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Biomédica

Coorientador: Ricardo Nuno Pereira Verga e Afonso Vigário,
Professor Auxiliar Convidado, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova
de Lisboa

Coorientadora: Carla Maria Quintão Pereira, Professora
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Isabel Simões Catarino
Arguente: Prof. Doutor Paulo António Martins Ferreira Ribeiro
Vogal: Prof. Doutor Ricardo Nuno Pereira Verga e Afonso Vigário



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro, 2018

Desenvolvimento de um Pupilómetro de Baixo Custo

Copyright © Mariana Nunes Maleiro dos Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, professor Ricardo Vigário e professora Carla Quintão. Obrigada por me terem ajudado e motivado ao longo desta tese, por todas as explicações e opiniões sábias que me deram e, principalmente, pela boa disposição e humanidade com que o fazem.

Agradeço também ao meu colega Raul, por termos partilhado frustrações e problemas ao longo das nossas teses e sobretudo pelas soluções que criámos.

A todos os amigos que fiz na faculdade, em particular ao grupo da sueca, por tudo o que partilhámos durante estes cinco anos. Um enorme agradecimento à Beatriz Pamplona ('pampi') e ao Pedro Spínola, são sem dúvida duas pessoas muito especiais, a quem devo muito da minha aprendizagem e crescimento durante a minha passagem pela faculdade. Obrigada por serem os melhores companheiros tanto nas noites de estudo como nas noites de festas.

Não podia deixar de agradecer aos meus amigos de Sintra, que levo desde pequena no meu coração. Obrigada por me acompanharem há tantos anos e por me apoiarem incondicionalmente. Amizades que duram há tanto tempo são, decerto, para conservar para toda a vida.

Um especial agradecimento ao meu namorado Rodrigo por ser um grande pilar na minha vida. Obrigada por contrastares o meu modo impulsivo de ser e por me apaziguares quando mais preciso.

Deixo o maior dos agradecimentos a toda a minha família por todo o carinho, orgulho e confiança que depositam em mim. Agradeço ao meu irmão Miguel e à sua noiva Inês, que são duas referências para mim. Obrigada por me ajudarem sempre que preciso. Um eterno agradecimento aos meus pais, que tanto amo. Obrigada por serem as melhores pessoas que conheço e por fazerem de mim a pessoa que sou hoje. Um especial agradecimento à minha avó, a quem também devo muito pela contribuição para a minha educação e formação pessoal. Obrigada por cuidares sempre de mim.

Palavras-chave: Pupílómetro; Pupílómetro de Vídeo; Dilatação e Contração Pupilar; Segmentação Pupilar; Pupíloметрия a Estímulo Frio; Atividade Simpática.

O pupílómetro desenvolvido permite estudar as variações pupilares ao longo do tempo, a nível basal ou perante diversos tipos de estímulo, como emocionais, cognitivos ou luminosos. Enquadra-se na categoria de pupílómetros monoculares de vídeo, ou seja, mede continuamente apenas um olho do utilizador. Os resultados destas medições podem ser aplicados a várias áreas, destacando-se a psicologia, o *neuro-marketing* e o meio clínico.

Os sistemas de pupíloметрия de vídeo existentes no mercado têm um custo elevado, pelo que o objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um pupílómetro de baixo custo. Aliando o custo reduzido a uma elevada portabilidade, espera-se potenciar mais estudos de pupíloметрия nas áreas mencionadas acima.

O sistema proposto segue a estrutura do sistema de *eye tracking* de baixo custo desenvolvido anteriormente pela Eng^a Filipa Gamas. O sistema de pupíloметрия tem então por base um telemóvel e um computador, que, devido à sua grande acessibilidade nos dias de hoje, não trará custos adicionais. A partir de uma aplicação *Android*, o telemóvel grava continuamente a imagem da pupila com a câmara frontal e, simultaneamente, pode apresentar estímulos no ecrã. Existe ainda um suporte para o telemóvel, cujo objetivo é fixar uma posição relativa entre a câmara e o olho do utilizador. Seguidamente, os dados são transferidos para o computador e são processados com um algoritmo de segmentação pupilar através de uma interface construída em *Matlab*.

Para validar os resultados obtidos pelo pupílómetro desenvolvido, realizou-se um estudo na área da neurociência, com 12 sujeitos, de modo a compreender o funcionamento do sistema nervoso autónomo (SNA) aquando de um estímulo frio. Os sinais obtidos foram analisados segundo a variação percentual do diâmetro pupilar, onde se obteve uma média de 19.6% e 12.3% para o início e final de estímulo, respetivamente. Analisou-se também os tempos de reação do SNA ao estímulo obtendo-se valores médios bastante próximos no início e final de estímulo: 2.7 e 2.6 segundos, respetivamente. Realizou-se também uma pequena análise sobre a taxa de dilatação pupilar e as frequências presentes. Os resultados demonstraram-se coerentes com a literatura, concluindo-se que o pupílómetro tem um funcionamento adequado para esta aplicação.

ABSTRACT

Keywords: Pupillometer; Video Pupillometer; Pupillary Dilation and Contraction; Pupillary Segmentation; Cold Stimulus Pupillometry; Sympathetic Activity.

The pupillometer developed allows the study of pupillary variations over time, at a basal level or in response to several kinds of stimuli, like emotional, cognitive or luminous. The device fits the category of monocular video pupillometers, meaning that it continuously measures one of the user's eyes. Therefore, this device. The results of this measurements can be applied to several areas, such as psychology, neuromarketing and clinical.

The pupillometry systems available on the market have a high cost associated, thus, the goal of this dissertation is the development of a low-cost pupillometer. Combining the reduced cost to a high portability, it is expected an increasing in the quantity of studies in the above-mentioned areas.

The proposed system follows the structure of the eye tracking system previously developed by engineer Filipa Gamas. The pupillometry system is then based on a mobile phone and a computer, that, due to their great accessibility nowadays, won't bring additional costs. Through an Android application, the phone continuously records the image of the pupil with its front camera, while its screen may present stimuli. There is also a support for the mobile phone, whose purpose is to keep a steady position between the camera and the user's eye. The information is then transferred to the computer and processed through a Matlab interface with a pupillary segmentation algorithm.

To validate the results obtained by the developed pupillometer, a study was carried out with 12 subjects. The purpose of this study in the field of neuroscience is to understand the functioning of the autonomic nervous system (ANS) during a cold stimulus. The obtained signals were analysed according to the percentage variation of the pupillary diameter, where the mean values obtained were 19.6% and 12.3% at the beginning and at the end of stimulus, respectively. The reaction times of the ANS were also analysed, obtaining identical mean values at the beginning and at the end of stimulus: 2.7 e 2.6 seconds, respectively. A small analysis was also carried out on the pupillary dilation rate and the present frequencies. The results were consistent with literature, thus we concluded that the pupillometer has a proper functioning for this application.

LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	xix
1. Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Aplicações	2
1.3 Objetivos	2
2. Conceitos Fundamentais	5
2.1 Anatomia do Olho e Formação da Imagem.....	5
2.2 Sistema Nervoso.....	7
2.2.1 Organização do Sistema Nervoso.....	7
2.2.2 Sistema Nervoso Autónomo.....	8
2.3 Controlo das Variações Pupilares pelo SNA.....	10
2.3.1 Valores de Referência	11
3. Estado da Arte.....	13
3.1 A Pupilometria	13
3.2 Aplicações e Estudos.....	14
3.2.1 Área Clínica.....	14
3.2.2 Psicologia	15
3.2.3 <i>Neuro-Marketing</i>	16
3.3 Estímulos na Pupilometria	17
3.3.1 Estímulos Frios.....	17
4. Sistema Proposto.....	19
4.1 Componentes do Sistema	19
4.1.1 Telemóvel.....	19
4.1.2 Suporte	20
4.2 Utilização do Sistema.....	23
5. Métodos.....	25
5.1 A Aplicação.....	25
5.1.1 Introdução.....	25
5.1.2 Calibração.....	27
5.1.3 Estímulo	29
5.2 Segmentação da Pupila – Algoritmo.....	29
5.2.1 Frequência de Amostragem.....	30

5.2.2	Pré-processamento da Imagem.....	32
5.2.3	Deteção da Pupila.....	33
5.3	Interface de Análise de Dados.....	40
5.4	Estudo de Pupilometria com Estímulo Frio	42
5.4.1	Caracterização da Amostra.....	42
5.4.2	Procedimento Experimental:	42
5.4.3	Análise de Dados.....	43
6.	Resultados.....	47
6.1	Parâmetros de Interesse.....	47
6.2	Frequências dos Sinais	49
7.	Discussão.....	51
7.1	Análise Geral dos Resultados Obtidos	51
7.2	Variação Percentual do Diâmetro Pupilar	52
7.3	Tempos de Reação Pupilar.....	53
7.4	Velocidades de Dilatação Pupilar	54
7.5	Frequência Pupilar.....	54
8.	Conclusão.....	55
8.1	Considerações Gerais	55
8.2	Trabalho futuro.....	56
	BIBLIOGRAFIA	57
	APÊNDICE A	61
	APÊNDICE B	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação das estruturas anatômicas do olho humano, corte sagital. Adaptado de [8].	5
Figura 2.2 – Ilustração do mecanismo de acomodação do cristalino na visão de (a) objetos distantes e (b) objetos próximos. Adaptado de [8].	7
Figura 2.3 – Esquema da organização do sistema nervoso e percurso de um estímulo sensorial neste. Adaptado de [8].	9
Figura 2.4 – Representação dos mecanismos e músculos envolvidos na contração e dilatação da pupila consoante 3 tipos de luminosidade: (a) intensa, (b) normal e (c) reduzida. Adaptado de [16].	10
Figura 3.1 – Imagens de pupilómetros comerciais. A: pupilómetro digital simples; B: pupilómetro de vídeo automático; C: pupilómetro de vídeo de mão. Retirado de [23].	14
Figura 4.1 – Imagem do telemóvel Huawei P8 Lite 2017.	19
Figura 4.2 – Imagem do <i>cardboard</i> original. Retirado de [31].	20
Figura 4.3 - Processo de focagem de objetos próximos sem lente (A) e com lente (B). Retirado de [34].	21
Figura 4.4 – Esquema do circuito elétrico inserido no interior do <i>cardboard</i>	22
Figura 4.5 – Imagem do <i>cardboard</i> final, com o circuito elétrico de iluminação integrado.	23
Figura 4.6 – Esquema das etapas de utilização do sistema de pupilometria.	23
Figura 5.1 – Ilustração da fase de introdução da aplicação ' <i>EyeDare</i> '.	26
Figura 5.2 – Imagem da colocação correta do telemóvel no <i>cardboard</i>	27
Figura 5.3 – Representação do processo de calibração na aplicação ' <i>EyeDare</i> ', adequado a estudos com estímulos externos.	28
Figura 5.4 – Representação do processo de recolha de um estímulo da aplicação.	29
Figura 5.5 - Sinais de variação do diâmetro pupilar com o tempo processados com diferentes frequências de amostragem. Sinal superior: 30 <i>frames/s.</i> ; Sinal inferior: 10 <i>frames/s.</i>	31
Figura 5.6 – Espectro de potência do sinal de pupilometria, onde se observa as frequências dominantes do sinal processado com uma frequência de amostragem de 30 <i>frames/s.</i>	31
Figura 5.7 – Imagens resultantes da passagem da imagem HSV para escala de cinzentos utilizando as três componentes (H, S e V), a componente de tom (H), a componente de saturação (S) e a componente de valor (V).	32

Figura 5.8 – Ilustração das transformações usadas no pré-processamento da imagem original e respectivas funções do <i>Matlab</i> .	33
Figura 5.9 – Ilustração do processo de detecção da pupila: Fase 1.	35
Figura 5.10 - Exemplo do processo de detecção dos limites íris-pupila para uma diagonal principal.	36
Figura 5.11 – Representação da detecção dos limites íris pupila numa região com reflexão de luz.	37
Figura 5.12 – Ilustração do processo de detecção da pupila: Fase 2.	38
Figura 5.13 – Representação da sequência de <i>frames</i> onde existe um pestanejar dos olhos e valor do coeficiente de correlação entre elas.	39
Figura 5.14 – Imagens da entrada na interface de análise de dados e painel de opções do utilizador.	40
Figura 5.15 – Imagem da interface durante o processamento dos dados.	41
Figura 5.16 – Imagem da interface na apresentação de resultados.	42
Figura 5.17 - Sinal de áudio retirado do vídeo gravado durante a recolha de dados.	43
Figura 5.18 – Sinais de variação do diâmetro pupilar com o tempo, não processado (azul) e pré-processado (vermelho).	44
Figura 5.19 – Sinal de variação do diâmetro pupilar com o tempo e valores de diâmetro, em píxeis, necessários ao cálculo da percentagem de dilatação pupilar.	45
Figura 5.20 - Apresentação do resultado final do processamento dos dados, que inclui os parâmetros de interesse.	46
Figura 6.1 – Espectrograma, pertencente ao sujeito 11 (S_{11}). A: escala da frequência completa. B: escala da frequência ampliada nas baixas frequências. Linhas azuis verticais: marcação de início e fim de estímulo.	49
Figura 6.2 - Espectrograma médio de todos os sujeitos. Linha azul: início de estímulo.	50
Figura 7.1 - Sinal de variação do diâmetro pupilar com o tempo do S_{11} .	52
Figura 7.2 – Representação de uma dilatação de 19% do diâmetro pupilar.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Índices Refrativos (n) de estruturas do olho [11].....	6
Tabela 6.1 - Resultados do estudo de pupilometria a estímulo frio: percentagens de dilatação pupilar e tempos de reação no início e fim de estímulo para cada sujeito, e respetivas médias e desvios padrão.....	48
Tabela 6.2 – Velocidade de dilatação pupilar no início e no final do estímulo e incerteza associada.	48

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

CPT	Teste de Pressão ao Frio, do inglês <i>Cold Pressure Test</i>
HSV	Tom, Saturação, Valor, do inglês <i>Hue, Saturation, Value</i>
LED	Díodo Emissor de Luz, do inglês <i>Light Emitting Diode</i>
MSNA	Atividade Nervosa Muscular Simpática, do inglês <i>Muscle Sympathetic Nerve Activity</i>
PF	Ponto Focal
RGB	Vermelho, Verde, Azul, do inglês <i>Red, Green, Blue</i>
SN	Sistema Nervoso
SNA	Sistema Nervoso Autônomo
SNAP	Sistema Nervoso Autônomo Parassimpático
SNAS	Sistema Nervoso Autônomo Simpático
SNC	Sistema Nervoso Central
SNP	Sistema Nervoso Periférico
SNS	Sistema Nervoso Somático

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O pupilómetro desenvolvido é um equipamento de medição da dimensão da pupila em ambiente de luminosidade controlada. Para o desenvolvimento deste sistema de pupilometria utilizou-se um telemóvel, onde foi instalada uma aplicação desenvolvida em *Android Studio*, um computador, um suporte para o telemóvel (*cardboard*) e um circuito de iluminação. Este equipamento enquadra-se na categoria de pupilómetros de vídeo monoculares, isto é, grava continuamente apenas um dos olhos do utilizador, neste caso o direito.

Uma vez que um pupilómetro é um aparelho não-invasivo, de fácil utilização e de resposta rápida, é vantajoso torná-lo o mais portátil e económico possível de modo a potenciar mais estudos com base na pupilometria. Na área clínica, a importância de utilizar um pupilómetro para estudar as dimensões da pupila, bem como as suas variações, reflete-se na informação obtida em relação ao bem-estar geral dos indivíduos. O pupilómetro permite obter um valor objetivo destas dimensões, enquanto o olho humano apenas pode avaliá-las subjetivamente, sendo estas muitas vezes influenciadas por vários fatores. Alguns exemplos são um indivíduo ter a íris muito escura e/ou pupilas bastante pequenas e a experiência da pessoa que está a examinar [1].

As pupilas de um indivíduo apresentam variações nas suas dimensões devido ao funcionamento do sistema nervoso autónomo (SNA), isto é, a atuação coordenada dos subsistemas nervosos simpático e parassimpático. Estes subsistemas podem ser ativados por fatores internos ou externos ao indivíduo. Emoções experienciadas, patologias diversas e processos cognitivos são alguns exemplos de fatores internos que alteram as dimensões da pupila. Alterações na luminosidade do ambiente e choques térmicos são fatores externos que estimulam o sistema nervoso e, por conseguinte, fazem também variar as dimensões pupilares [2].

Este projeto foi desenvolvido tendo por base a Dissertação de Mestrado em Engenharia Biomédica “Desenvolvimento de um *Eye Tracker* de Baixo Custo” [3] desenvolvida pela Eng^a Filipa Gamas em 2016/2017, cuja validação e calibração foi realizada pelo aluno Raul Vences

neste presente ano através da dissertação “Validação e calibração de um *eyetracker* de baixo custo” [4], ainda não publicada. Uma vez que os dois sistemas têm uma base comum, prevê-se que, no futuro, se possa combinar o *eye tracker* e o pupilómetro num único dispositivo. Esta fusão abre portas a estudos que necessitem de compreender os movimentos oculares de um indivíduo e as emoções ou processos cognitivos associados a estes.

1.2 Aplicações

Um pupilómetro pode ser utilizado como método de diagnóstico e como meio de compreensão de diversas patologias e fenómenos fisiológicos. Atualmente, utiliza-se a pupilometria em vários estudos na área da neurociência como mecanismo de compreensão do funcionamento do sistema nervoso autónomo, avaliando a sua capacidade de resposta a estímulos exteriores, ou avaliando apenas o seu funcionamento basal, isto é, na ausência de estímulos. Na área clínica utiliza-se ainda a pupilometria no estudo de diversas disfunções e patologias, como por exemplo a síndrome de Horner, ou em estudos sobre o efeito de drogas e álcool no sistema nervoso autónomo [5].

A pupilometria é também um método útil para estudos na área da psicologia, uma vez que a alteração das dimensões da pupila no ser humano pode ocorrer devido a alterações do seu estado emocional ou à carga cognitiva despertada por diversos processos intelectuais [4,5]. Uma vez estabelecida a relação entre a variação das dimensões da pupila e o estado emocional de um indivíduo, podemos utilizar a pupilometria na área do *neuro-marketing*, com o objetivo de compreender a perceção de um consumidor acerca de determinado produto ou campanha de *marketing* [7].

1.3 Objetivos

A maioria dos aparelhos de pupilometria desenvolvidos têm um custo elevado, e/ou grandes dimensões, ou seja, são de portabilidade reduzida. Estas características têm implicações negativas no caso de se pretender realizar estudos onde o indivíduo precise de ter alguma mobilidade ou apresente algum estado de agitação. Nestes estudos enquadram-se, por exemplo, aqueles que necessitem de algum tipo de atividade motora e/ou cognitiva por parte do indivíduo, ou onde este apresente algum estado de agitação. Para colmatar estas lacunas, este sistema visa a ter uma elevada portabilidade e acessibilidade, tendo um custo bastante reduzido, permitindo assim aumentar a quantidade de estudos na área da pupilometria. É de notar que o custo deste sistema reside apenas no *cardboard* e nos componentes elétricos do ao circuito de iluminação, uma vez que os restantes materiais necessários ao funcionamento do sistema – telemóvel e computador – têm uma grande acessibilidade nos dias de hoje. Este pupilómetro tem ainda outra grande vantagem: fazer a aquisição de dados em tempo real, sendo que o estímulo pode ser produzido pelo próprio dispositivo que faz a recolha de dados, o telemóvel.

No âmbito desta tese, e após o desenvolvimento do pupilómetro, foi ainda realizado um estudo de aplicação do dispositivo, com o objetivo de aferir do funcionamento do sistema nervoso

1.3 OBJETIVOS

autónomo através das variações pupilares associadas à aplicação de um estímulo frio. Neste estudo avaliou-se as percentagens de variação de área pupilar, os tempos e a velocidade de reação do sistema nervoso autónomo ao estímulo e ainda as frequências pupilares ao longo de todo o tempo de aquisição.

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 Anatomia do Olho e Formação da Imagem

É a partir dos olhos que o ser humano recolhe informação visual. A entrada de luz no globo ocular gera potenciais de ação na retina que, através do nervo ótico, são transmitidos ao cérebro onde se dá o processamento e interpretação das imagens recolhidas [8]. O olho humano tem um formato aproximadamente esférico com um diâmetro entre 22 e 27 mm [9]. Na Figura 2.1 encontram-se os principais componentes anatómicos do olho humano.

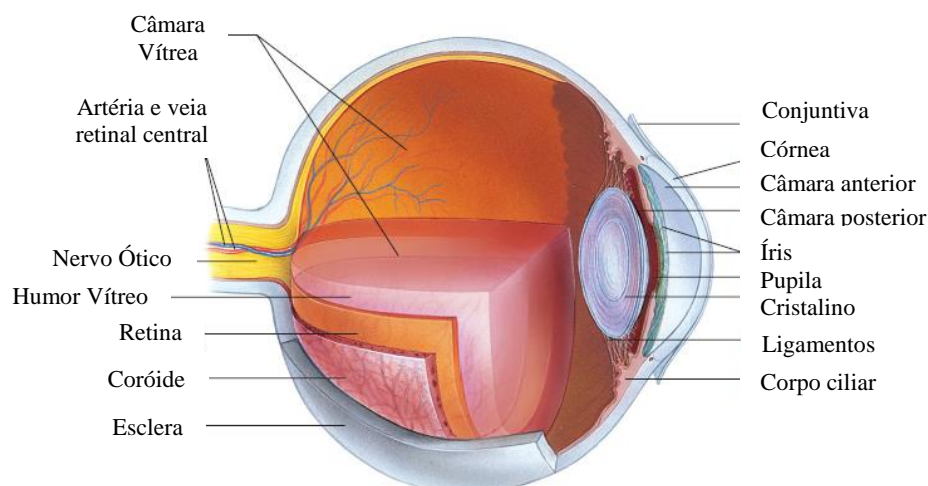


Figura 2.1 – Representação das estruturas anatómicas do olho humano, corte sagital.
Adaptado de [8].

O processo de formação da imagem inicia-se com a entrada de luz sequencialmente desde a córnea até à retina. Após a passagem da luz pela córnea, a pupila controla a quantidade que é refratada para o cristalino, para a câmara vítrea e finalmente para a retina. A córnea e o cristalino

CAPÍTULO 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

são duas estruturas oculares que funcionam como lentes biconvexas na focagem da imagem na retina [9].

A retina é constituída por duas camadas: a exterior, muito pigmentada e usualmente denominada como a ‘parte branca dos olhos’, e a interior bastante inervada e que tem como principal função responder à luz que a ela chega. A camada interior é formada por dois tipos de fotorreceptores: os bastonetes e os cones. Os bastonetes são as células em maior quantidade e reagem em condições de pouca luminosidade, fornecendo as noções de contraste e brilho. Os cones são sensíveis às cores e aos detalhes dos objetos [10]. Na área central da retina, denominada de fóvea, encontra-se uma grande densidade dos fotorreceptores do tipo cones, permitindo uma alta resolução da imagem formada. Os movimentos oculares ocorrem por forma a que os objetos de interesse fiquem focados nesta área. Na área periférica da retina existe uma pior resolução, mas é graças a esta área que se dá a deteção de movimento e a localização de objetos em todo o campo visual.

Durante a passagem da luz desde a córnea até à retina, esta é refratada de uma estrutura para a seguinte. A convergência mais significativa da luz dá-se na sua passagem do ar para a córnea, pois são as estruturas com a maior diferença de índices refrativos, como se pode observar na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Índices Refrativos (n) de estruturas do olho [11].

$n_{\text{córnea}}$	1.38
$n_{\text{humor aquoso}}$	1.34
$n_{\text{cristalino}}$	1.40
$n_{\text{humor vítreo}}$	1.34

Ainda que menos significativo, a luz converge na sua passagem pelo humor aquoso, cristalino e humor vítreo. Todos os raios de luz que entram paralelos no olho convergem num ponto, designado ponto focal (PF), onde a formação da imagem na retina é a mais nítida e definida possível. A córnea não se consegue ajustar ao ponto focal, uma vez que a sua forma é fixa e, por conseguinte, mantém sempre a mesma distância à retina. Contrariamente, o cristalino consegue modificar a sua forma de modo a alterar a sua potência ótica e focar melhor a imagem neste ponto. A este processo dá-se o nome de acomodação, que é a base da focagem da imagem na retina [7,10].

Como podemos observar pela Figura 2.2, o processo de acomodação permite ao olho focar objetos a distâncias diferentes. Quando o olho foca um objeto próximo, os músculos ciliares contraem devido a um estímulo do subsistema nervoso parassimpático, permitindo ao cristalino ficar mais espesso e com um formato mais esférico. Desta maneira o cristalino funciona como uma lente com maior curvatura, convergindo mais os raios de luz para a retina. Quando um objeto está distante, o sistema simpático inibe a ação dos músculos ciliares e o cristalino fica mais plano, pois não é necessária uma refração tão grande para se conseguir focar os objetos na retina [7,11].

É devido ao processo de acomodação que os objetos são bem focados na retina. A imagem formada no ponto focal da retina é uma imagem invertida, mas quando os potenciais de ação são transmitidos ao cérebro, este interpreta a imagem com a sua direção correta [8].

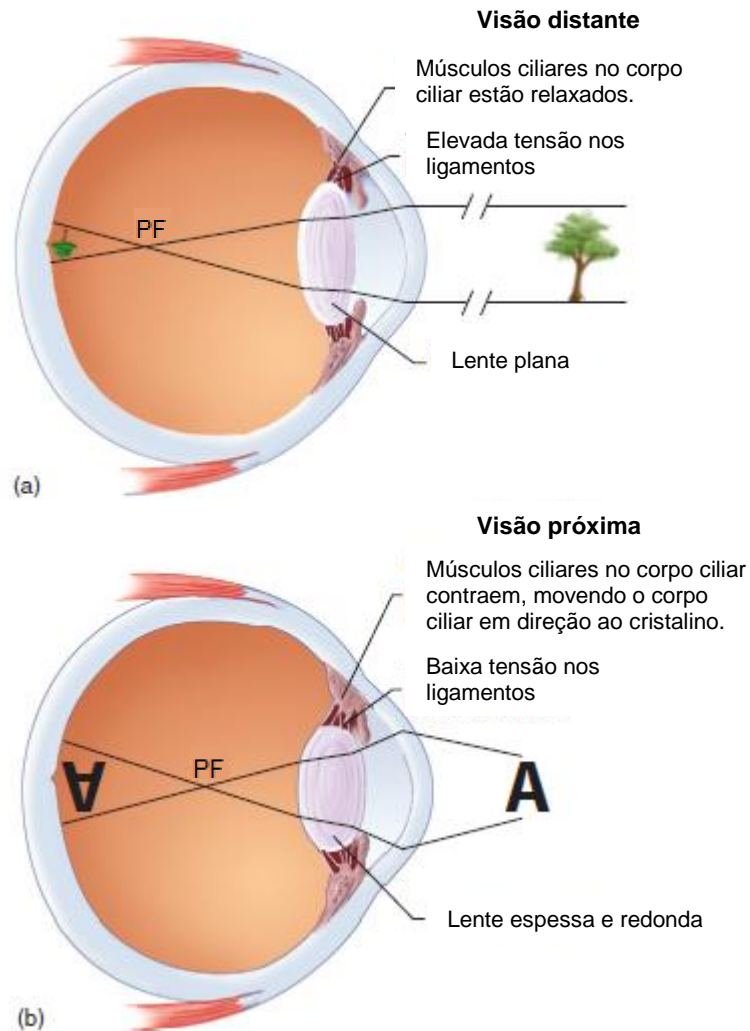


Figura 2.2 – Ilustração do mecanismo de acomodação do cristalino na visão de (a) objetos distantes e (b) objetos próximos. Adaptado de [8].

2.2 Sistema Nervoso

2.2.1 Organização do Sistema Nervoso

Para conseguir compreender os mecanismos que provocam as variações de tamanho da pupila, é necessário perceber como o Sistema Nervoso (SN) atua no corpo humano, particularmente como interpreta e origina respostas a estímulos. De modo a garantir o normal funcionamento do corpo humano, o SN regula e coordena diversas atividades com o objetivo de manter um ambiente relativamente estável dentro do corpo humano, isto é, a homeostasia. Quando um indivíduo recebe um estímulo sensorial, este é conduzido até aos principais centros

CAPÍTULO 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

integradores de informação – o cérebro e a medula espinal – onde se dá o seu processamento. Depois de processado, o estímulo pode dar origem a uma resposta imediata, ser armazenado na memória ou ser simplesmente ignorado. O SN é também responsável pelo controlo de músculos e glândulas, e por estabilizar e manter a atividade mental, isto é, o pensamento, a consciência, as emoções e a memória [8].

O SN pode ser classificado em termos estruturais como Sistema Nervoso Central (SNC) e Sistema Nervoso Periférico (SNP). O primeiro é constituído pelo cérebro e pela medula espinal e o SNP é constituído por neurónios sensoriais (aférentes) e motores (eferentes). O SNP deteta e transmite estímulos ao SNC, que os processa e gera respostas. Em termos funcionais, considera-se que o SN possui ainda uma componente sensorial, responsável por transmitir os potenciais de ação dos recetores sensoriais ao SNC, e uma componente motora, que transmite os potenciais de ação do SNC aos órgãos efetores.

Como podemos ver na Figura 2.3, na existência de um estímulo, a componente sensorial guia os potenciais de ação que dele advém ao SNC. Este interpreta cada potencial de ação e gera outros potenciais que são conduzidos pela componente motora até aos órgãos efetores, de modo a produzir uma resposta. A divisão motora divide-se numa unidade voluntária, o Sistema Nervoso Somático (SNS), e numa unidade involuntária, o Sistema Nervoso Autónomo (SNA). O SNS controla o movimento e os pensamentos conscientes, atuando sobre os músculos esqueléticos efetores e permitindo ao ser humano ser capaz de pensar conscientemente e movimentar voluntariamente o seu corpo. O SNA controla atividades inconscientes, como a contração do músculo cardíaco ou a secreção de certas glândulas [8].

2.2.2 Sistema Nervoso Autónomo

O SNA desempenha um papel fundamental na manutenção da homeostasia do corpo humano, regulando toda a sua atividade involuntária, destacando-se a atividade cardíaca, respiratória e digestiva, a temperatura corporal e funções urinárias. Este sistema é ativado por centros localizados no tronco cerebral, na medula espinal e no hipotálamo e, contrariamente ao sistema nervoso somático que tem um efeito sempre excitatório nos músculos esqueléticos, o sistema nervoso autónomo pode ter efeitos excitatórios ou inibitórios nos tecidos. Por exemplo, o SNA pode estimular atividades digestivas em situações de repouso, ou inibi-las em situações de exercício físico [8].

Este sistema pode ser dividido em duas grandes unidades: Sistema Nervoso Autónomo Simpático (SNAS) e Sistema Nervoso Autónomo Parassimpático (SNAP). O sistema simpático é responsável por preparar o corpo para condições de atividade física ou de *stress*, despertando uma série de alterações fisiológicas que visam a uma maior oxigenação e nutrição do cérebro, do coração e dos músculos esqueléticos. Destas alterações destacam-se o aumento do débito cardíaco, da frequência cardíaca, da pressão arterial e do fluxo sanguíneo. O sistema parassimpático atua principalmente em condições de repouso, favorecendo os processos anabólicos e provocando uma redução dos fatores enumerados anteriormente [13].

As duas unidades do SNA atuam maioritariamente de forma antagónica, como se pôde

2.2 SISTEMA NERVOSO

observar com os exemplos anteriores. Existem ainda casos onde os sistemas simpático e parassimpático atuam de forma complementar e independente. Um exemplo de uma ação complementar dos dois sistemas é o caso das glândulas salivares, onde ambos provocam a produção de saliva diferindo apenas na viscosidade. A glândula lacrimal é um exemplo da atuação independente, pois esta é innervada apenas pelo sistema nervoso parassimpático.

É graças a estes mecanismos de atuação entre sistema simpático e parassimpático que o SNA consegue assegurar o equilíbrio dos órgãos internos e dos sinais vitais do indivíduo [14].

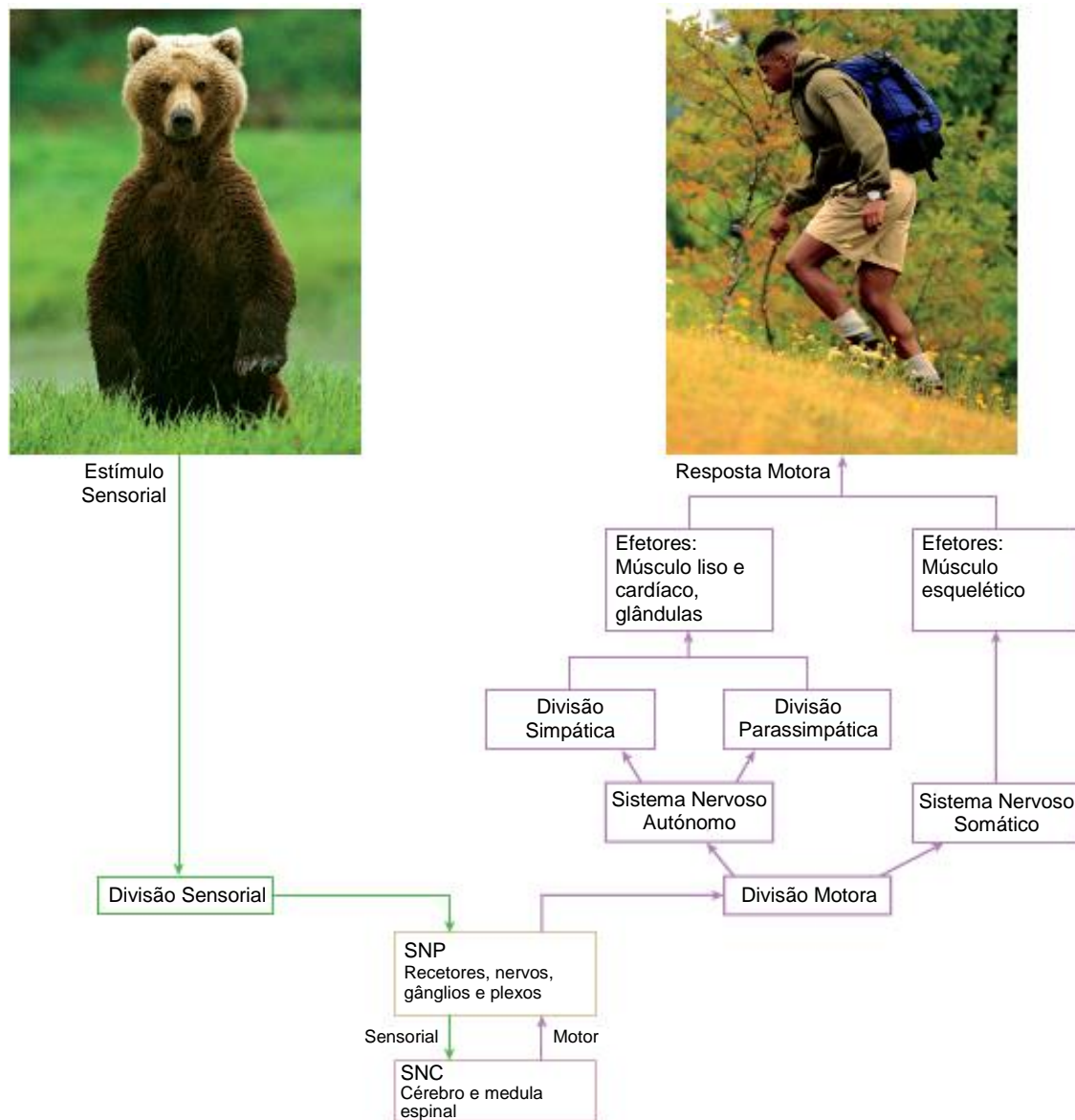


Figura 2.3 – Esquema da organização do sistema nervoso e percurso de um estímulo sensorial neste. Adaptado de [8].

2.3 Controlo das Variações Pupilares pelo SNA

A principal função da pupila é regular a quantidade de luz que chega à retina, de modo a otimizar a percepção visual dos objetos. Em ambientes de fraca luminosidade a pupila aumenta o seu tamanho de modo a aumentar a quantidade de luz que chegará à retina. Contrariamente, em ambientes de alta luminosidade, a pupila contrai, diminuindo esta quantidade [12].

Os movimentos de dilatação – midríase – e de contração – miose – da pupila são controlados pelo sistema nervoso simpático e parassimpático respetivamente. O sistema nervoso simpático é o responsável por estimular os músculos dilatadores da pupila, presentes na íris, o que resulta numa dilatação da pupila. O sistema nervoso parassimpático tem a função contrária, ou seja, estimula os músculos lisos circulares esfínteres da pupila, resultando numa contração desta [15]. A Figura 2.4 ilustra o resultado da ação dos dois sistemas, simpático e parassimpático, nos músculos da íris e na pupila.

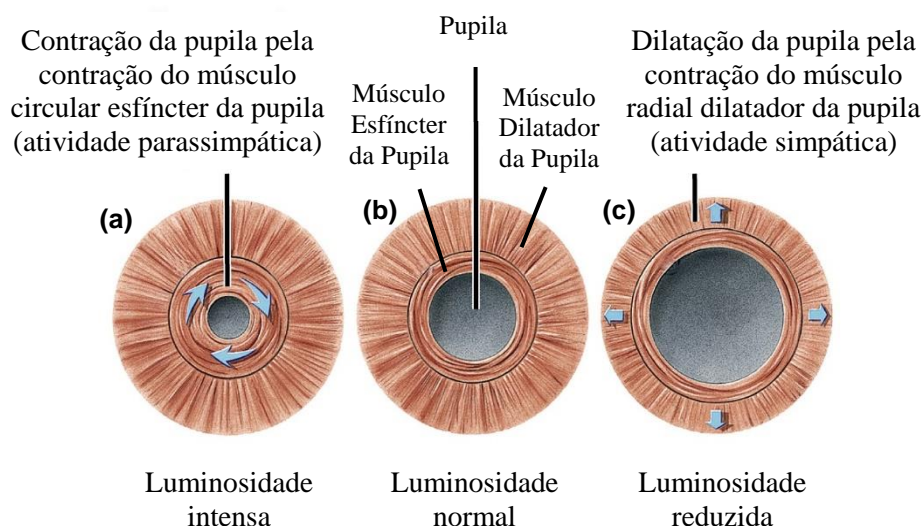


Figura 2.4 – Representação dos mecanismos e músculos envolvidos na contração e dilatação da pupila consoante 3 tipos de luminosidade: (a) intensa, (b) normal e (c) reduzida. Adaptado de [16].

Para além das alterações na luminosidade do ambiente, existem outros exemplos de variações pupilares comuns, como o estado de sono, onde a atividade simpática decresce, e a atividade parassimpática predomina, resultando numa miose. Pensamentos espontâneos e estímulos emocionais fortes causam descargas no hipotálamos que viajam pelo cérebro e pelo sistema nervoso simpático até ao músculo dilatador da pupila, causando uma midríase [12].

Na ausência de estímulo existem também variações pupilares, embora bastante menos acentuadas. A pupila encontra-se constantemente em contínuos movimentos de contração e dilatação, mesmo em condições de luminosidade constante. A estas oscilações espontâneas de pequena amplitude, dá-se o nome de *hippus* ou atetose pupilar. O *hippus* pupilar caracteriza-se por oscilações rítmicas de frequências inferiores a 0.04 Hz, de amplitude irregular e espasmódicas, isto é, têm origem em movimentos musculares involuntários. Estas oscilações

2.3 CONTROLO DAS VARIAÇÕES PUPILARES PELO SNA

ocorrem nas pupilas dos dois olhos, em fase [17]. Embora ainda não se conheça a origem destas oscilações, estudos recentes relatam que possivelmente estas derivam apenas da atividade parassimpática e não entre o balanço entre a atividade dos subsistemas nervosos simpático e parassimpático, como era esperado [18].

2.3.1 Valores de Referência

O diâmetro pupilar pode variar entre 2 a 4 mm na presença de luz e entre 4 a 8 mm no escuro [19]. As condições de luminosidade podem levar a pupila a variar até ao dobro do seu diâmetro. Dilatações devidas a processos cognitivos são muito menores, sendo, regra geral, menores que 0.5 mm [20].

O tempo de reação da pupila a um estímulo luminoso é cerca de 200 ms [20]. No entanto, a capacidade de dilatação e contração como meio de resposta a um estímulo – reflexos pupilares – são função da idade. Os reflexos pupilares são menores na infância, devido a um incompleto desenvolvimento do sistema nervoso simpático, e nas idades mais avançadas, devido a uma perda do tônus muscular. Os reflexos pupilares são também função do estado de consciência, de fadiga e emocional de cada indivíduo [12].

O tempo de reação a um estímulo emocional, isto é, desde a apresentação do estímulo até ao pico de máxima dilatação pupilar, é cerca de 2 a 3 segundos, sendo que quanto mais rápido se observar a dilatação, mais forte foi o estímulo para a pessoa. Quando um indivíduo desempenha uma tarefa cognitiva, o tempo de reação pupilar é entre 1 a 2 segundos do início da referida tarefa, sendo que no fim desta ocorre uma contração gradual ou instantânea [21].

ESTADO DA ARTE

3.1 A Pupilometria

Ao longo dos tempos têm sido utilizados instrumentos para determinar o tamanho da pupila. Começaram por ser muito rudimentares, como cilindros de papel ou régua. Depois começou-se a associar os equipamentos analógicos existentes a equipamentos de registo de variações de movimento – quimógrafos [20]. Com o desenvolvimento tecnológico, passou-se a utilizar câmaras fotográficas para gravar imagens da pupila e, posteriormente, medir a sua dimensão. Para melhorar a eficácia da recolha das imagens, recorreu-se a luz ultravioleta e, atualmente, a luz infravermelha, para iluminar os olhos, uma vez que a pupila não responde a este tipo de radiação [20]. Utilizando câmaras sensíveis a estas radiações, é possível a obtenção de imagens da pupila em ambientes de luminosidade reduzida ou inexistente, eliminando a interferência da luz exterior nas variações das dimensões da pupila [22].

O número de imagens captadas por segundo pelas câmaras fotográficas também aumentou levando ao aparecimento da pupilometria de vídeo, onde o olho é gravado continuamente. Este tipo de pupilometria permite descrever evolução temporal do tamanho pupilar – pupilogramas. Os métodos de medição do tamanho da pupila, após o aparecimento dos primeiros pupilómetros digitais e fotográficos, consistiam na projeção das imagens da pupila e na sua medição com régua. Ao longo do tempo foram desenvolvidos algoritmos computacionais que permitiram a automatização de todo o processo de medição do diâmetro pupilar, sendo agora possível obter esse valor quase instantaneamente e sem recurso a aparelhos analógicos [20].

Atualmente existe uma gama muito variada de pupilómetros, que diferem em determinadas características, como as suas resoluções espaciais e temporais, a capacidade de gravação das dimensões da pupila continuamente, a opção de produzir um ou diversos estímulos luminosos, entre outras. Os pupilómetros podem ser monoculares, ou seja, efetuarem medidas relativamente a apenas um olho, ou binoculares, quando efetuam medidas relativas aos dois olhos. Estes últimos são particularmente utilizados na neuro-oftalmologia. Existem ainda alguns sistemas de

pupilometria que dispõem de um *eye tracker* e outros que são capazes de gravar o grau de acomodação dos olhos [4].

Na Figura 3.1 pode observar-se vários tipos de pupilómetros existentes.



Figura 3.1 – Imagens de pupilómetros comerciais. A: pupilómetro digital simples; B: pupilómetro de vídeo automático; C: pupilómetro de vídeo de mão. Retirado de [23].

Na primeira imagem (Figura 3.1, A) encontra-se representado um pupilómetro mais simples, que mede momentaneamente o diâmetro das duas pupilas, bem como a distância entre os seus centros. Estes pupilómetros têm um custo de cerca de 70 € e têm uma elevada portabilidade. No entanto, não permitem realizar estudos sobre variações pupilares ao longo do tempo, pois não têm a capacidade de gravar a pupila continuamente. Nas restantes imagens (Figura 3.1, B e C) apresentam-se dois pupilómetros de vídeo, sendo que o último possui também uma grande portabilidade. Estes aparelhos já conseguem fazer a medição das variações pupilares ao longo do tempo com uma alta precisão. No entanto, a grande desvantagem destes pupilómetros comerciais reside no seu custo que pode chegar aos milhares de euros. Outra desvantagem é a portabilidade, uma vez que mesmo com o pupilómetro de mão, é necessária uma pessoa a segurá-lo, o que pode levar a erros se o utilizador necessitar de mover a cabeça [23].

3.2 Aplicações e Estudos

Existem vários estudos desenvolvidos com o objetivo de compreender a resposta da pupila nos mais diversos contextos. Destes destacam-se os seguintes estudos.

3.2.1 Área Clínica

Cirurgia refrativa

A cirurgia refrativa é um procedimento que visa a corrigir erros refrativos como a miopia, a hipermetropia e o astigmatismo. Neste tipo de cirurgia o diâmetro da pupila, especialmente quando medido num ambiente privado de luz, é um parâmetro importante para estimar a zona de ablação, ou seja, a área de tecido a remover [4].

Defeito visual aferente

Para verificar se existe algum tipo de defeito nas vias oculares aferentes, isto é, as vias que percebem os estímulos através do olho e os conduzem até ao cérebro, é usualmente feito um teste simples com uma lanterna. Este teste consiste na passagem de um feixe de luz pelo olho, funcionando como um estímulo de flash de luz, de modo a verificar se a pupila contrai. Para garantir a inexistência deste defeito é necessário medir simultaneamente os dois olhos, assim, a utilização de um pupilómetro binocular para este efeito permite uma maior fiabilidade nos resultados, pois não depende da parcialidade e da imprecisão da observação humana [4].

Patologias decorrentes no sono

Estes tipos de patologias podem ser diagnosticados através do estudo do estado de sonolência de um indivíduo, isto é, momentos antes de adormecer. Neste estado ocorrem oscilações pupilares lentas e de grande amplitude. Estas oscilações são diferentes entre pacientes com apneia do sono tratada e não tratada, bem como entre pessoas saudáveis e pessoas com hipersónia – sono diurno excessivo com ou sem aumento das horas de sono noturno. Para medir estas oscilações, de modo a diagnosticar estas patologias, o mais simples é utilizar um pupilómetro num ambiente escuro e silencioso [4].

Efeitos do consumo de substâncias psicotrópicas no sistema autónomo

Qualquer substância psicotrópica, quer seja um fármaco ou uma droga ilegal, tem efeitos no sistema nervoso, que, consequentemente, altera as dimensões da pupila. Utilizar a pupilometria em sujeitos sob efeito destas substâncias, permite determinar qual o ramo do sistema autónomo, simpático ou parassimpático, é mais afetado consoante a substância utilizada [4].

Síndrome de Horner

A síndrome de Horner é uma patologia decorrente da interrupção do nervo oculossimpático entre a sua origem no hipotálamo e o olho. Fisicamente resulta num abatimento da pálpebra superior e numa pupila de menores dimensões num dos lados da cara. Uma das características desta síndrome é um atraso temporal na dilatação da pupila afetada quando existe uma diminuição da luminosidade do ambiente. A utilização de um pupilómetro binocular é o método mais fiável de fazer o diagnóstico desta síndrome, permitindo ainda a distinção entre pacientes com síndrome de Horner e pacientes com tamanhos diferentes das duas pupilas – anisocoria –, pois estes últimos não têm este atraso temporal de dilatação, sendo que a diferença entre o tamanho das duas pupilas se mantém sempre constante [4].

3.2.2 Psicologia

Contrariamente às aplicabilidades clínicas, a pupilometria só começou a ser um instrumento utilizado para realizar estudos em psicologia mais recentemente. A observação de variações no tamanho da pupila pode ajudar à compreensão de processos cognitivos e emocionais.

CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

Psicologia Cognitiva

O interesse de estudar as variações do diâmetro pupilar como função de processos cognitivos tem aumentado nos últimos anos. Foram feitos diversos estudos que comprovam um aumento no tamanho da pupila de indivíduos que se encontrem em situações de elevada atenção ou de carga cognitiva [20].

Entre os vários estudos feitos nesse contexto, salienta-se um dos primeiros, realizado por Hess e Polt, onde pediram aos participantes para resolver multiplicações. Verificou-se que quanto maior a dificuldade do problema, mais dilatada a pupila se encontrava [20].

Outro estudo ilustrativo da relação entre as dimensões da pupila e os processos cognitivos consiste em pedir tarefas simples a um grupo de pessoas saudáveis (grupo de controlo) e um grupo de pessoas com síndrome de Down. Ambos os grupos demonstraram capacidades de atenção e performances semelhantes, no entanto, o grupo de pessoas com síndrome de Down apresentava uma maior dilatação das pupilas. Estes resultados sugerem que para realizar a mesma tarefa, uma pessoa com síndrome de Down requer uma maior carga cognitiva [24].

Psicologia das emoções

Emoções como o medo, a raiva, a dor e o *stress* caracterizam-se por provocar uma dilatação nas pupilas, denominada de dilatação psicossensorial. Assim, a pupilometria pode ser utilizada para medir respostas emocionais de forma objetiva [4].

Uma dilatação na pupila pode ser observada quando são apresentadas imagens ou sons que despertem emoções fortes, quer sejam emoções agradáveis ou aversivas. Salienta-se novamente um estudo realizado por Hess e Polt, onde se verificou que as mulheres apresentam uma dilatação da pupila quando expostas a fotografias de bebés. Este estudo revela ainda que indivíduos heterossexuais apresentam também uma dilatação da pupila quando lhes são apresentadas fotografias de pessoas do sexo oposto [20].

Conclui-se então, que um indivíduo apresenta uma dilatação da pupila quando exposto a qualquer estímulo emocional que lhe provoque sensações agradáveis ou aversivas. Por outro lado, estímulos neutros não provocam alterações significativas das dimensões pupilares [20].

3.2.3 Neuro-Marketing

Apesar de pequeno, o aumento da dimensão da pupila com processos cognitivos e emocionais é visível. Atualmente não se utiliza muito a pupilometria na área do *marketing*, mas alguns estudos têm vindo a ser realizados. Esta aplicação está bastante dependente da utilização de um equipamento de *eye tracking*, para além do pupilómetro. Através do conhecimento acerca dos espaços onde o indivíduo fixou o seu olhar durante algum tempo e a respetiva resposta pupilar, consegue-se compreender a resposta cognitiva e emocional do consumidor, relativamente ao que despertou mais a sua atenção e interesse quando observa um qualquer meio publicitário (cartaz, anúncio televisivo, site, etc.) [25,6].

3.3 Estímulos na Pupilometria

Os estímulos podem ser considerados agentes externos ou internos que provoquem uma reação num órgão ou num sistema [26]. Neste caso, considera-se como estímulo de pupilometria tudo o que leve a uma dilatação ou contração pupilar irregular por via de ativação do sistema nervoso autónomo. Podem induzir-se variações pupilares através de inúmeros estímulos, como descrito no primeiro capítulo. Os estímulos que mais fazem variar as dimensões pupilares são estímulos externos inesperados, que provocam uma reação imediata do sistema nervoso autónomo. Dentro destes temos o caso dos estímulos frios, que desencadeiam respostas em várias estruturas fisiológicas.

3.3.1 Estímulos Frios

Em primeiro lugar, os estímulos frios no corpo humano são percecionados ou unicamente pelos sensores de frio, ou por estes em conjunto com os sensores de dor, ambos presentes na pele. Estes sensores desencadeiam potenciais de ação que se deslocam em direção ao cérebro onde são interpretados como uma sensação de frio e/ou dor. O hipotálamo é uma das principais estruturas que dita as respostas fisiológicas ao frio, uma vez que uma das suas principais funções é a de regulação da temperatura corporal [26,27].

Para estudar as respostas originadas pelo sistema nervoso autónomo a um estímulo frio geralmente aplica-se um teste de pressão ao frio (CPT, do inglês: *cold pressure test*), onde se mergulha uma extremidade do corpo (mãos, pés ou cara) num recipiente de água fria, à temperatura de 0°. Ao mergulhar as mãos ou os pés num recipiente de água fria, é ativado o sistema nervoso simpático que gera respostas como o aumento da atividade nervosa muscular simpática (MSNA, do inglês: *muscle sympathetic nerve activity*), da pressão sanguínea e da taxa cardíaca. Estas alterações funcionam como meio de resposta a uma situação de *stress* e são originadas de modo a aumentar a temperatura corporal. Com o aumento da MSNA, os músculos dilatadores da pupila são também excitados, pelo que é de esperar uma grande dilatação da pupila aquando o contacto das mãos/pés com a água fria [28,29].

Sabe-se que o efeito dos recetores de dor na ativação do sistema nervoso simpático depende do local do corpo estimulado e tende a ser maior na cara. No entanto, quando o CPT é aplicado na cara não são desencadeadas apenas respostas simpáticas, mas é também ativado o sistema nervoso parassimpático que desencadeia uma diminuição da atividade cardíaca – bradicardia. Assim, a atividade parassimpática sobrepõe-se à simpática, fazendo com que um indivíduo tenha os processos fisiológicos necessários à possibilidade de ficar sem respirar durante o maior período possível [28]. Uma vez que o CPT realizado na cara gera respostas pupilares mais acentuadas, faria mais sentido realizar-se o estudo pupilometria utilizando este estímulo. No entanto, a estrutura do pupilómetro não é à prova de água, o que não permite gravar as variações pupilares nessas condições. Optou-se então por fazer o CPT com uma mão dos indivíduos, pois também produz respostas bastante visíveis, para além de ser mais confortável para a pessoa que realiza o estudo. Os resultados deste estudo são também mais claros, uma vez se sabe que apenas existe atividade simpática aquando do estímulo.

CAPÍTULO 3. ESTADO DA ARTE

Existem bastantes estudos que relacionam o CPT com a atividade cardiovascular e que têm como resultado as respostas descritas anteriormente. Já na área da pupilometria não existem muitos estudos publicados com objetivo de perceber as estruturas e os mecanismos envolvidos nas respostas pupilares autonómicas durante realização de um CPT. Um dos poucos estudos que mediu as variações pupilares com o frio obteve os seguintes resultados: uma midríase rápida e imediatamente após a imersão da mão na água fria, seguida de uma miose gradual [30]. Estes resultados vão ao encontro com a existência de uma resposta simpática aquando do choque térmico, seguida de um período recuperação da sensibilidade normal da mão.

SISTEMA PROPOSTO

4.1 Componentes do Sistema

Seguindo os mesmos princípios do sistema de *eye tracking*, previamente desenvolvido pela Eng^a Filipa Gamas [3] e com continuação do atual aluno Raul Vences [4], e de modo a criar um sistema complementar, o sistema de pupilometria desenvolvido utiliza também um telemóvel, um suporte e um computador.

4.1.1 Telemóvel

O telemóvel utilizado é um *Huawei P8 Lite 2017* com 8 MP de câmara frontal, ecrã *Full-HD* (1080p) de 5,2 polegadas (Figura 4.1). Este é utilizado para efetuar a recolha da imagem da pupila através da sua câmara frontal e o seu ecrã pode ser utilizado para a visualização de estímulos passíveis a alterar das dimensões da pupila, incluindo os que envolvem processos cognitivos ou emocionais.



Figura 4.1 – Imagem do telemóvel Huawei P8 Lite 2017.

4.1.2 Suporte

O suporte para o telemóvel tem por base o *cardboard*, ilustrado na Figura 4.2. Este suporte é geralmente usado para fins de realidade virtual e tem uma constituição bastante simples. Pode descrever-se o *cardboard* como sendo uma pequena caixa de cartão desdobrável, que se une através de zonas com velcro. É constituído por uma zona para colocar o telemóvel, por um botão na face superior, que quando pressionado clica indiretamente no ecrã, e por duas lentes. Este produto traz ainda uma fita que fixa o *cardboard* à cabeça do utilizador, fazendo com que os seus olhos mantenham sempre a mesma posição relativamente ao telemóvel. Isto é uma grande vantagem do sistema, pois o utilizador pode então movimentar a cabeça livremente, sem comprometer os resultados obtidos.



Figura 4.2 – Imagem do *cardboard* original. Retirado de [31].

A - *Cardboard* não montado, perspetiva frontal; B - *Cardboard* não montado, perspetiva lateral; C - *Cardboard* montado, perspetiva frontal; D - *Cardboard* montado, perspetiva posterior.

Como se pôde observar, a estrutura deste sistema permite que apenas um olho seja gravado, sendo neste caso o olho direito, pois, segundo a correta colocação do telemóvel no *cardboard*, que veremos mais à frente, é o que fica dentro do ângulo de visão da câmara frontal. As duas lentes presentes no *cardboard* são biconvexas, têm 35 mm de diâmetro, um ângulo de visão de 80° e 36,9 mm de distância focal [31,32]. A estrutura do *cardboard* implica uma grande proximidade do ecrã do telemóvel aos olhos, proximidade essa que não está contemplada na amplitude de acomodação ocular e que resulta em imagens desfocadas formadas na retina (Figura 4.3, A) [33]. As lentes estão presentes para corrigir este problema, fazendo com que as imagens

4.1 COMPONENTES DO SISTEMA

sejam percebidas pelo olho mais longínquas do que realmente estão e, por conseguinte, sejam corretamente focadas na retina (Figura 4.3, B) [34].

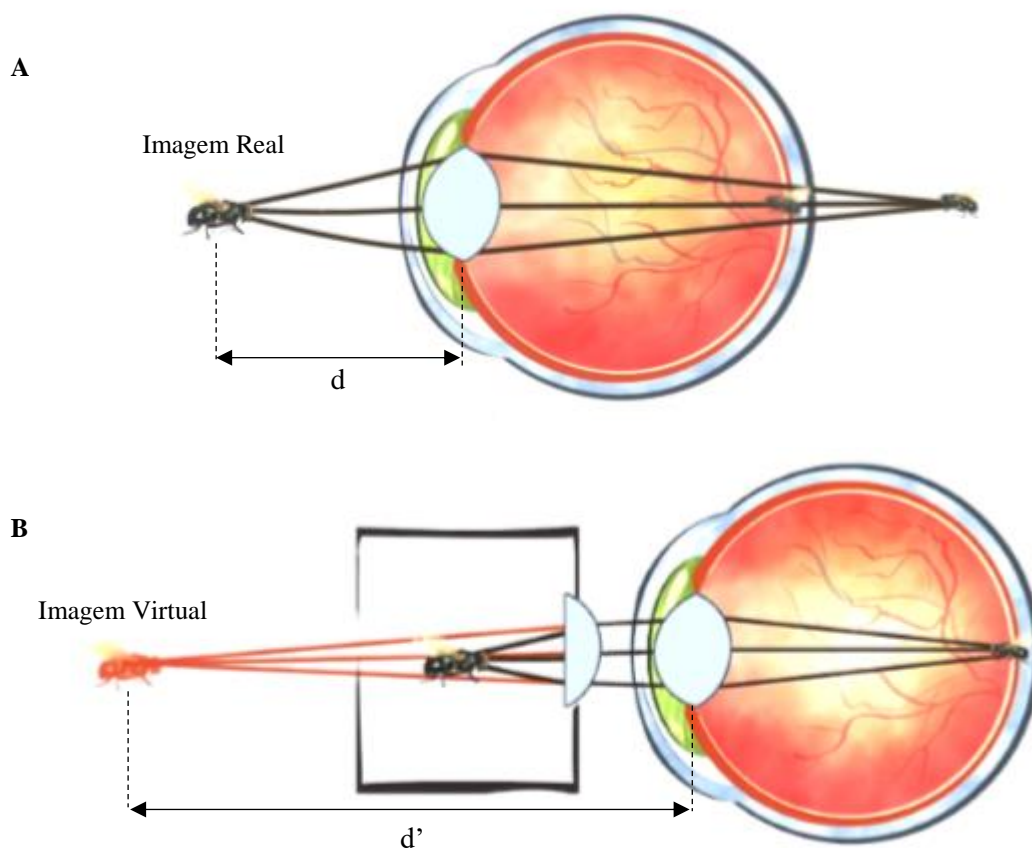


Figura 4.3 - Processo de focagem de objetos próximos sem lente (A) e com lente (B).
Retirado de [34].

d : distância do objeto (imagem real) ao olho; d' : distância da imagem virtual ao olho.

Devido à existência de um ambiente escuro no interior do *cardboard*, apenas se consegue recolher imagens do olho suficientemente nítidas quando nesse espaço exista um qualquer tipo de iluminação. A utilização de *flash* foi escolhida no sistema de *eye tracking* previamente desenvolvido, porém é um inconveniente para um sistema de pupilometria, pois, não só é desconfortável para o utilizador, como a sua utilização acaba por ser um estímulo luminoso excessivamente intenso que alteraria bastante as dimensões pupilares. Deste modo, a utilização de *flash* num estudo das variações do tamanho da pupila com um determinado estímulo enviesaria os resultados obtidos.

Para contornar este inconveniente, foi instalado um pequeno circuito elétrico de iluminação no interior do *cardboard*, no sentido de se assegurar que no seu interior existe um ambiente suficientemente iluminado e de luminosidade o mais constante possível. Como se pode observar pela Figura 4.4, o circuito é bastante simples, consistindo apenas numa fonte de tensão

CAPÍTULO 4. SISTEMA PROPOSTO

de 6V, proporcionada por duas pilhas de 3V ligadas em série, um interruptor, uma resistência e dois LEDs emissores de luz branca.

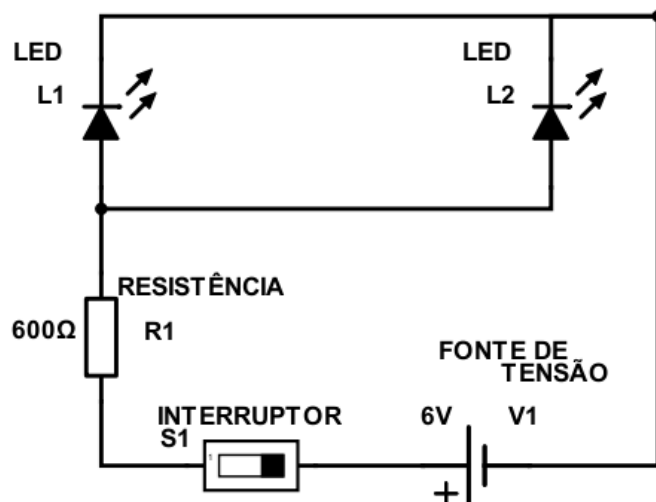


Figura 4.4 – Esquema do circuito elétrico inserido no interior do cardboard.

Decidiu-se colocar a resistência neste circuito para limitar a corrente à entrada dos LEDs, limitando assim a intensidade luminosa destes. Caso contrário tornar-se-ia bastante desconfortável para o utilizador ter uma luz tão forte apontada aos seus olhos. A corrente gerada pelas duas pilhas é de aproximadamente 5.8 mA, pelo que cada LED é alimentado com 2,9 mA (metade).

A potência consumida neste circuito é de 0,035 W. Este circuito é alimentado por duas pilhas de lítio de 3 V, que têm uma capacidade de 210 mAh cada [35]. Como as pilhas estão ligadas em série, apenas se somam as tensões e a capacidade mantém-se a mesma [36]. Para calcular a autonomia do sistema, divide-se então a capacidade pela corrente consumida:

$$\text{Autonomia} = \frac{210 \text{ mAh}}{5.8 \text{ mA}} \approx 36.21 \text{ h}$$

O valor da corrente consumida no circuito foi calculado teoricamente, sendo que na prática as pilhas nunca fornecem os 6 V completos, nem geram uma corrente tão elevada, pelo que a autonomia deve ser ligeiramente maior do que este valor. Conclui-se então que este sistema tem, na pior das hipóteses, cerca de 36 horas de autonomia em pleno funcionamento.

Apesar de apenas um olho ser gravado nas recolhas de dados, foram instalados dois LEDs, com a mesma posição relativa a cada olho, para garantir que os dois olhos se encontrem sob as mesmas condições de luminosidade. A Figura 4.5 ilustra o *cardboard* no seu aspeto final, já com o circuito descrito anteriormente.



Figura 4.5 – Imagem do *cardboard* final, com o circuito elétrico de iluminação integrado.
Imagem esquerda: vista inferior do suporte, com as pilhas, o suporte e o interruptor.
Imagem direita: vista do compartimento do telemóvel, com os LEDs acesos.

4.2 Utilização do Sistema

A utilização do sistema proposto passa por quatro procedimentos, esquematizadas na Figura 4.6. Após a decisão do estudo a realizar, a utilização do sistema inicia-se com uma fase de recolha de dados, que utiliza o suporte e o telemóvel descritos anteriormente. Esta fase está também dependente de uma aplicação *Android*, através da qual é feita a recolha de dados, que será descrita no capítulo seguinte. Posteriormente é necessário transferir-se os dados recolhidos para um computador para prosseguir à sua análise e exibição dos resultados em *Matlab*



Figura 4.6 – Esquema das etapas de utilização do sistema de pupilometria.

MÉTODOS

Neste capítulo será explicada toda a metodologia utilizada no desenvolvimento do equipamento de pupilometria. É explicado o funcionamento da aplicação ‘*EyeDare*’, bem como o algoritmo de detecção da pupila e a interface implementada. Neste capítulo pode ainda compreender-se o estudo de pupilometria a estímulo frio realizado.

5.1 A Aplicação

A aplicação deste sistema foi anteriormente desenvolvida pela Eng^a Filipa Gamas no âmbito da sua Dissertação “Desenvolvimento de um *Eye Tracker* de Baixo Custo” [3]. Esta aplicação, ‘*EyeDare*’, destina-se à recolha de dados em formato de vídeo (.mp4) e foi desenvolvida em *Android Studio* 2.3, que utiliza *Java* como linguagem de programação. Ao contrário da aplicação original, neste momento não existe um requisito de *flash* frontal pelos motivos mencionados no capítulo anterior. Isto permite à aplicação correr numa maior percentagem de dispositivos de sistema operativo *Android*, uma vez que os únicos requisitos são a existência de câmara frontal e níveis de API 21: *Android* 5.0 (*Lollipop*) ou superior [3].

A aplicação tem várias interfaces de interação com o utilizador, podendo ser dividida em três fases principais: introdução, calibração e estímulo.

5.1.1 Introdução

Nesta primeira fase, a aplicação ‘*EyeDare*’ é constituída por quatro etapas que se encontram representadas na Figura 5.1.

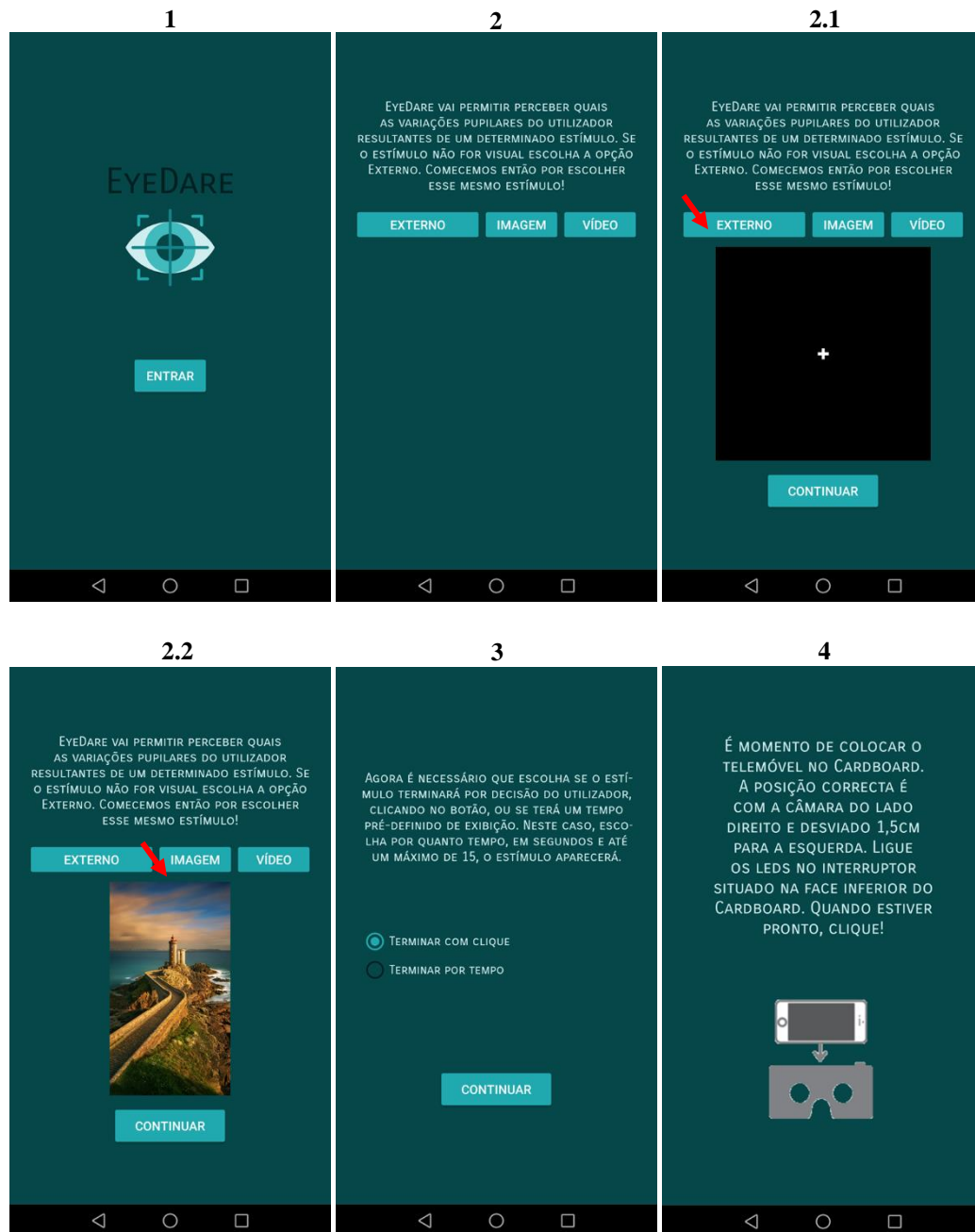


Figura 5.1 – Ilustração da fase de introdução da aplicação 'EyeDare'.

- 1 – Entrada na aplicação;
- 2 – Escolha do tipo de estímulo:
 - 2.1 – Externo;
 - 2.2 – Visual (imagem).
- 3 – Escolha de como terminar o estímulo;
- 4 – Instruções de preparação para a recolha de dados.

Inicialmente existe uma página de apresentação da aplicação, com o seu nome e o seu logótipo (Figura 5.1, 1). De seguida, é pedido ao utilizador para escolher que tipo de estímulo pretende, conforme o estudo a realizar utilize um estímulo externo ou visual. Se escolher a opção 'Externo' é automaticamente escolhida uma imagem com uma cruz branca no centro, que

funciona como referência para ajudar o utilizador a focar o seu olhar em frente (Figura 5.1, 2.1). Caso o estímulo seja visual, o utilizador pode escolher uma qualquer imagem ou vídeo através do acesso ao armazenamento interno do telemóvel (Figura 5.1, 2.2). A opção de estímulo externo foi acrescentada à aplicação original, pois na pupilometria é usual realizar-se vários estudos deste tipo. As opções de estímulos visuais já existiam na aplicação original. Estas foram mantidas no caso de se pretender realizar algum estudo sobre a carga cognitiva ou emocional de um utilizador perante uma certa imagem ou vídeo. No entanto, a utilização deste tipo de estímulo será mais interessante em estudos que aliem a pupilometria ao seguimento da atenção visual através de *eye tracker*. Escolhido o estímulo, o utilizador pode decidir se quer que este seja apresentado durante um tempo pré-definido, ou se terminará pressionando o botão do *cardboard* (Figura 5.1, 3). O último passo antes de se proceder à calibração é uma instrução de como deve colocar o telemóvel no *cardboard* (Figura 5.1, 4).

A correta colocação do telemóvel no *cardboard*, seguindo as instruções dadas na aplicação, encontra-se ilustrada na Figura 5.2.



Figura 5.2 – Imagem da colocação correta do telemóvel no *cardboard*.

Após a correta colocação do telemóvel no *cardboard*, o ecrã fica inacessível ao utilizador. Assim, para avançar as etapas que se seguem, pressiona-se o botão presente na face superior do *cardboard*.

5.1.2 Calibração

Nesta fase a aplicação procede à recolha de dados necessários à calibração. Este processo sofreu bastantes alterações relativamente à aplicação original pois contrariamente ao sistema de *eye tracking* não há necessidade de obter informação prévia sobre os movimentos oculares.

Para o sistema de pupilometria, inicialmente pensou-se que seria necessário um processo de calibração onde se fazia variar a claridade do ecrã através da apresentação de sucessivas imagens,

CAPÍTULO 5. MÉTODOS

utilizando, por exemplo, estímulos com variações de grau cinzento, variando entre o preto e o branco. Uma vez analisados os dados desta calibração, concluiu-se que as variações de claridade do ecrã não eram significativas para levarem a uma contração gradual da pupila. Isto deve-se, possivelmente, à luminosidade dos LEDs no interior do *cardboard* ser mais intensa do que as pequenas variações de claridade do ecrã. Com o despiste deste fator, que poderia constituir uma variável extra a ser analisada num estímulo de vídeo, conclui-se poder avançar diretamente para a apresentação dos estímulos.

Atualmente a calibração recolhida constitui apenas uma medição basal das variações pupilares na ausência de estímulos, para qualquer estudo. Este processo passou então a ser recolhido em vídeo e é apenas apresentada uma imagem com uma complexidade visual semelhante à do estímulo durante 10 segundos. Na Figura 5.3 está ilustrado o processo de calibração para um estímulo externo.

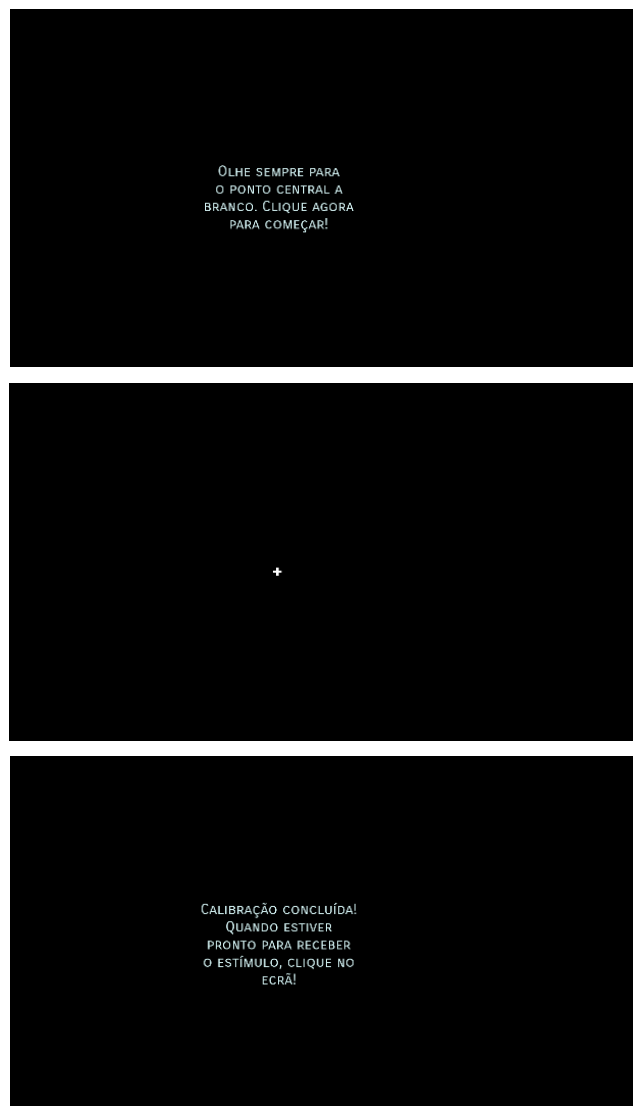


Figura 5.3 – Representação do processo de calibração na aplicação 'EyeDare', adequado a estudos com estímulos externos.

5.1.3 Estímulo

A fase de estímulo, tal como a de calibração, foi programada para ser recolhida pela aplicação em formato de vídeo, de modo a obter como resultado as variações de tamanho pupilar ao longo do tempo. Neste caso o vídeo é gravado com som para permitir fazer anotações verbais no decorrer da experiência, por exemplo, marcando o início e o final de um estímulo, caso necessário.

Tanto para o vídeo da calibração como para o da recolha, durante o estímulo, aumentou-se a exposição da câmara frontal, uma vez que o ambiente dentro do *cardboard* é escuro e a seleção automática de exposição do próprio telemóvel resultava em vídeos com baixa luminosidade e, por conseguinte, pouca nitidez. Na Figura 5.4 pode observar-se o processo de recolha do estímulo.



Figura 5.4 – Representação do processo de recolha de um estímulo da aplicação.

- A – Estímulo externo;
- B – Estímulo visual tipo imagem;
- C – Indicação de fim da experiência.

5.2 Segmentação da Pupila – Algoritmo

O algoritmo de segmentação da pupila foi desenvolvido de modo a obter uma deteção precisa do limite entre a íris e a pupila. Num sistema de *eye tracking* a correta deteção deste limite é menos crucial do que num estudo de pupilometria, pois pequenos erros nessa deteção resultam, regra geral, em variações mínimas nas estimativas das coordenadas do centro da pupila. Já num sistema de pupilometria é importante obter as dimensões da pupila o mais corretamente possível, e, por isto, reconhecer com rigor os seus limites é um ponto fulcral no algoritmo desenvolvido.

A montagem do sistema de iluminação no interior do *cardboard* e as alterações feitas à aplicação, nomeadamente o aumento de exposição da câmara frontal, contribuíram para a obtenção de *frames* o mais otimizadas possível para serem pré-processadas. A colocação fixa dos LEDs no *cardboard* produz uma pequena reflexão de luz, sempre na mesma posição e com as mesmas dimensões. Isto constitui uma grande vantagem em relação ao *flash* que cria reflexões de luz maiores e de tamanhos variáveis. Excluem-se então casos mais complicados em que a pupila do utilizador ficaria maioritariamente obstruída pelas reflexões de luz existente.

5.2.1 Frequência de Amostragem

Para identificar as variações pupilares nos vídeos recolhidos pela aplicação, estes são analisados *frame a frame* utilizando uma taxa/frequência de amostragem de 10 *frames*/segundo. Esta taxa foi escolhida após uma análise de qual o valor que permite um bom tempo de processamento de dados em *Matlab*, sem comprometer a correta deteção das variações pupilares e o conteúdo de frequência das mesmas. A taxa máxima a que se poderia analisar os dados seria 30 *frames*/s, pois esta é a taxa de aquisição dos vídeos. Para avaliar se o processamento dos dados se poderia realizar a uma taxa de amostragem de 10 *frames*/s, analisou-se o mesmo vídeo para estas diferentes taxas.

Nesta análise estudou-se a frequência máxima do sinal obtido, uma vez que a frequência de amostragem (F_a) está relacionada com a deteção de frequências do sinal (F_s) através da relação $F_a=2F_s$ [37]. Sabe-se então que com uma frequência de amostragem de 30 *frames*/s consegue analisar-se frequências pupilares numa gama até 15 Hz e, pelo mesmo raciocínio, uma frequência de amostragem de 10 *frames*/s constitui uma gama de frequências do sinal até 5 Hz. Assim, é importante perceber se o sinal obtido através da F_a máxima não possuía frequências acima de 5 Hz e se a correlação entre os sinais resultantes com as diferentes frequências de amostragem é elevada, ou seja, se os resultados obtidos são idênticos.

Para fazer a correlação dos dois sinais é necessário que eles tenham o mesmo número de pontos, pelo que se fez uma interpolação dos pontos do sinal correspondente a uma $F_a=10$ *frames*/s, para corresponder ao número de pontos do sinal com uma $F_a=30$ *frames*/s. Os resultados obtidos podem ser observados nos gráficos da Figura 5.5. Procedeu-se ao cálculo da correlação entre os sinais, obtendo-se o valor de 0.997, o que significa que os sinais são bastante semelhantes.

5.2 SEGMENTAÇÃO DA PUPILA – ALGORITMO

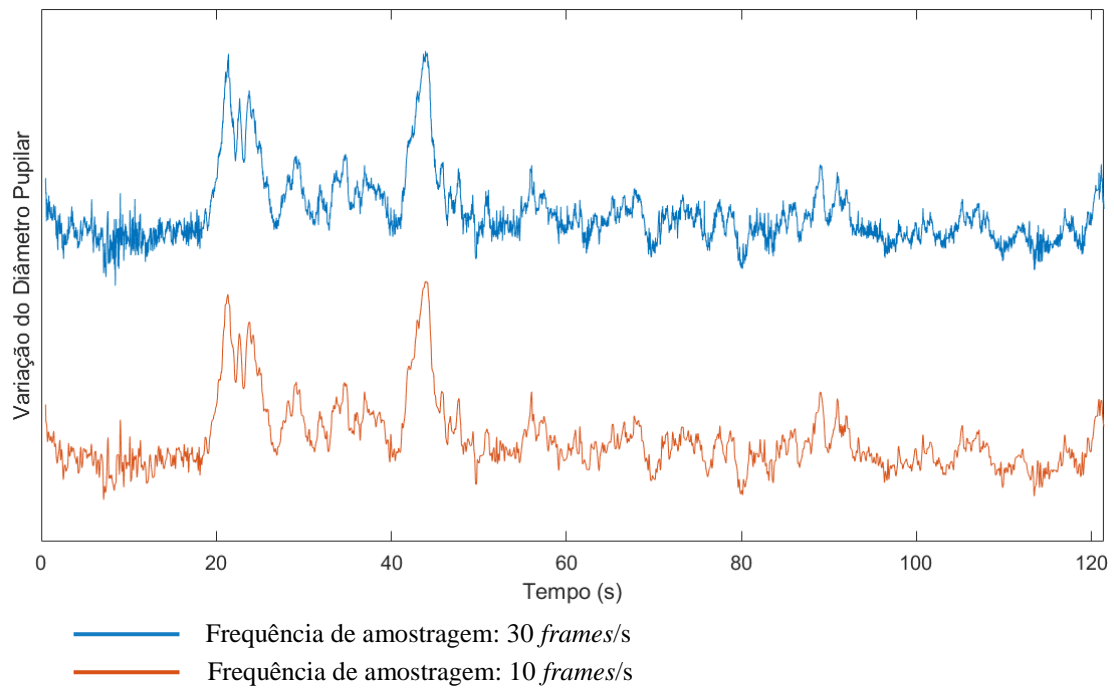


Figura 5.5 - Sinais de variação do diâmetro pupilar com o tempo processados com diferentes frequências de amostragem. Sinal superior: 30 *frames/s*.; Sinal inferior: 10 *frames/s*.

De seguida analisou-se as frequências predominantes da série temporal processada com a maior frequência de amostragem. Aqui verificou-se que as frequências de interesse se encontram numa gama de valores bastante inferior a 5 Hz (Figura 5.6).

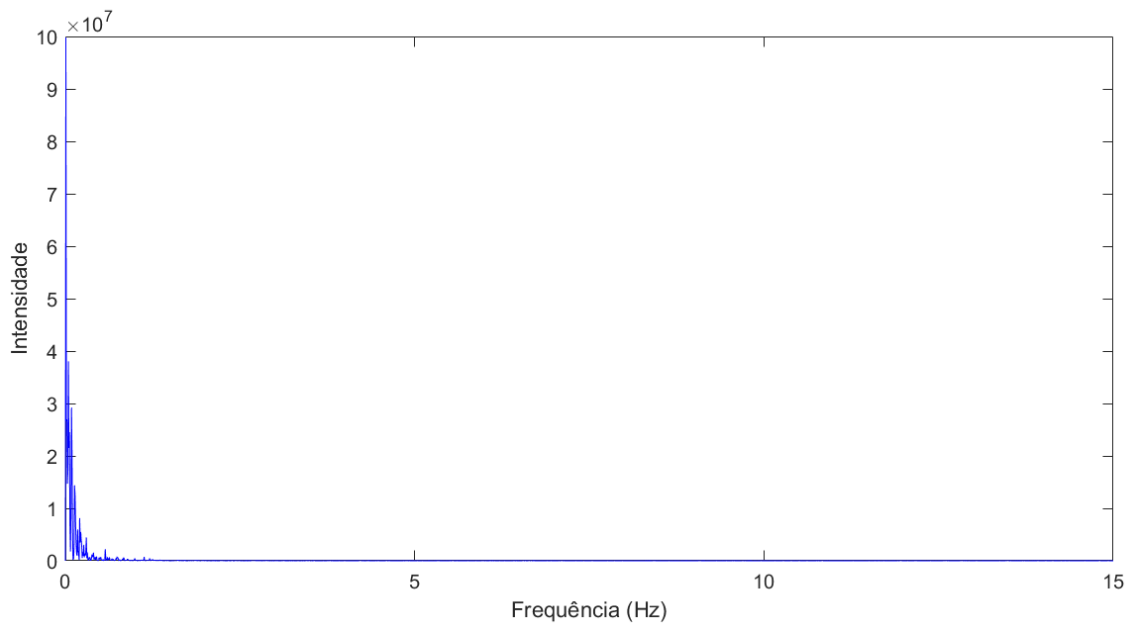


Figura 5.6 – Espectro de potência do sinal de pupilometria, onde se observa as frequências dominantes do sinal processado com uma frequência de amostragem de 30 *frames/s*.

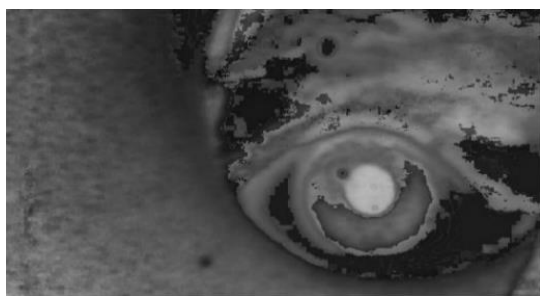
Conclui-se então que se pode efetuar a análise dos dados a uma taxa de amostragem de 10 *frames/s* sem perder informação relevante sobre as variações pupilares e diminuindo assim o tempo de processamento dos dados.

5.2.2 Pré-processamento da Imagem

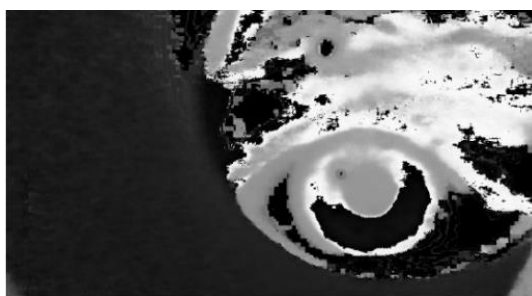
O primeiro passo para segmentar a pupila em cada *frame* é fazer um correto pré-processamento da imagem com o intuito de melhorar os contrastes na imagem, e assim facilitar a detecção da fronteira íris-pupila. Neste algoritmo passou-se de uma representação a cores RGB (do inglês Red, Green, Blue) para uma representação em HSV (do inglês *Hue*, *Saturation*, *Value*). Nesta representação a imagem contém três matrizes sobrepostas, tal como nas imagens RGB, mas em vez das três cores primárias aditivas, as matrizes correspondem ao tom, à saturação e ao valor de luminosidade da imagem. O tom é apenas outra palavra para cor, ou seja, nesta matriz são guardados os valores das cores da imagem. A matriz saturação contém o valor de pureza do tom e a última matriz descreve o valor de luminosidade da cor [38].

Esta representação de cores – HSV – foi escolhida ao invés da representação em RGB, pois o resultado final consiste numa imagem mais contrastada, que posteriormente facilita a segmentação pupilar. Após a conversão de RGB em HSV, converte-se a imagem para escala de cinzentos utilizando a componente de saturação da imagem pois é esta que produz melhores contrastes entre a íris e a pupila, como se pode observar pela Figura 5.7.

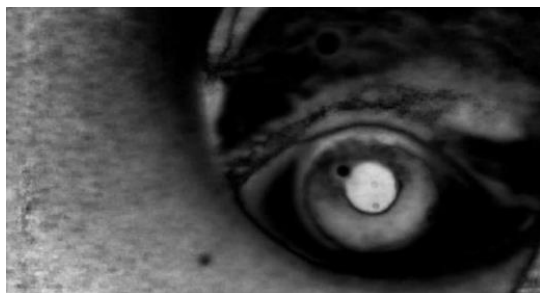
H, S e V



H



S



V



Figura 5.7 – Imagens resultantes da passagem da imagem HSV para escala de cinzentos utilizando as três componentes (H, S e V), a componente de tom (H), a componente de saturação (S) e a componente de valor (V).

5.2 SEGMENTAÇÃO DA PUPILA – ALGORITMO

O último passo do pré processamento foi a realização do complementar da imagem, sendo que esta transformação não altera os contrastes, apenas vai de encontro ao que o ser humano está habituado a observar. Na Figura 5.8 podemos visualizar todas as transformações desde a imagem original, ou seja, a imagem tal como é adquirida no vídeo, até à imagem pré-processada com que se irá, de seguida, detetar a pupila.

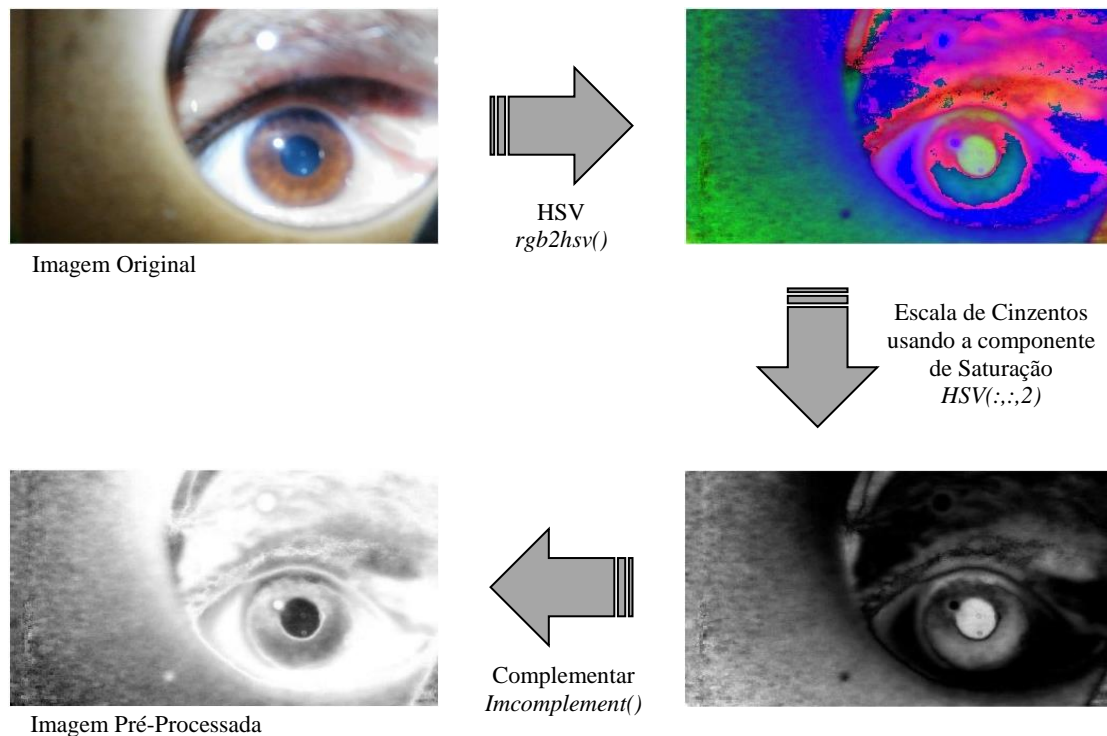


Figura 5.8 – Ilustração das transformações usadas no pré-processamento da imagem original e respetivas funções do *Matlab*.

5.2.3 Detecção da Pupila

A deteção da pupila é feita em duas fases. Na primeira fase é feita uma aproximação grosseira da região da pupila utilizando a função *imfindcircles()* do *Matlab*. Esta função procura os objetos de forma circular de uma imagem, retornando o seu centro e raio. Os objetos encontrados por esta função dependem de certos critérios como o nível de sensibilidade à forma circular e a gama de raios em que se procuram estes objetos. Neste primeiro passo para a deteção da pupila utiliza-se esta função com um alto valor de sensibilidade, de modo a garantir que a pupila é sempre identificada. Devido ao elevado valor deste parâmetro a função identifica não só a pupila, mas também vários outros objetos na imagem (Figura 5.9, 1.1). Para saber qual o círculo correspondente à pupila, procura-se o que combina o diâmetro e a distância ao centro mais próximos aos dos valores médios dos objetos identificados nas três *frames* anteriores (Figura 5.9, 1.2).

A única *frame* onde este critério não é passível de se aplicar é a primeira. Nesta *frame* recorre-se então a uma iteração onde se diminui a sensibilidade da função *imfindcircles()*, sendo esta

finalizada quando retornar apenas um objeto circular encontrado. Como a pupila é o objeto com menor excentricidade na imagem dentro da gama de raios imposta, isto é, mais circular, irá sempre ser o último objeto que a função encontra aquando de um determinado valor de sensibilidade baixo. Este processo não é realizado para todas as *frames*, pois aumentaria bastante o tempo de processamento, uma vez que a função *imfindcircles()* demora bastante tempo a ser realizada.

Após detetada a pupila na primeira *frame* do vídeo, as *frames* seguintes são recortadas numa região retangular envolvente, de modo a conter todo o olho e a eliminar grande parte do *cardboard*. Isto provoca uma redução do tamanho da imagem, o que leva a um menor tempo de processamento, pois a função *imfindcircles()*, analisa menos píxeis.

O motivo pelo qual esta função apenas pode funcionar como primeira aproximação é o facto de a pupila tomar bastantes vezes uma forma elíptica, devido à posição do olho não se encontrar sempre perfeitamente alinhada com a da câmara. Esta função serve então para identificar a pupila como um objeto circular, no entanto não garante uma precisão na deteção dos limites de transição íris-pupila.

Na Figura 5.9 encontra-se representado todo o processo da deteção da pupila correspondente à primeira fase.

1 – Fase 1

Imagem Pré-Processada

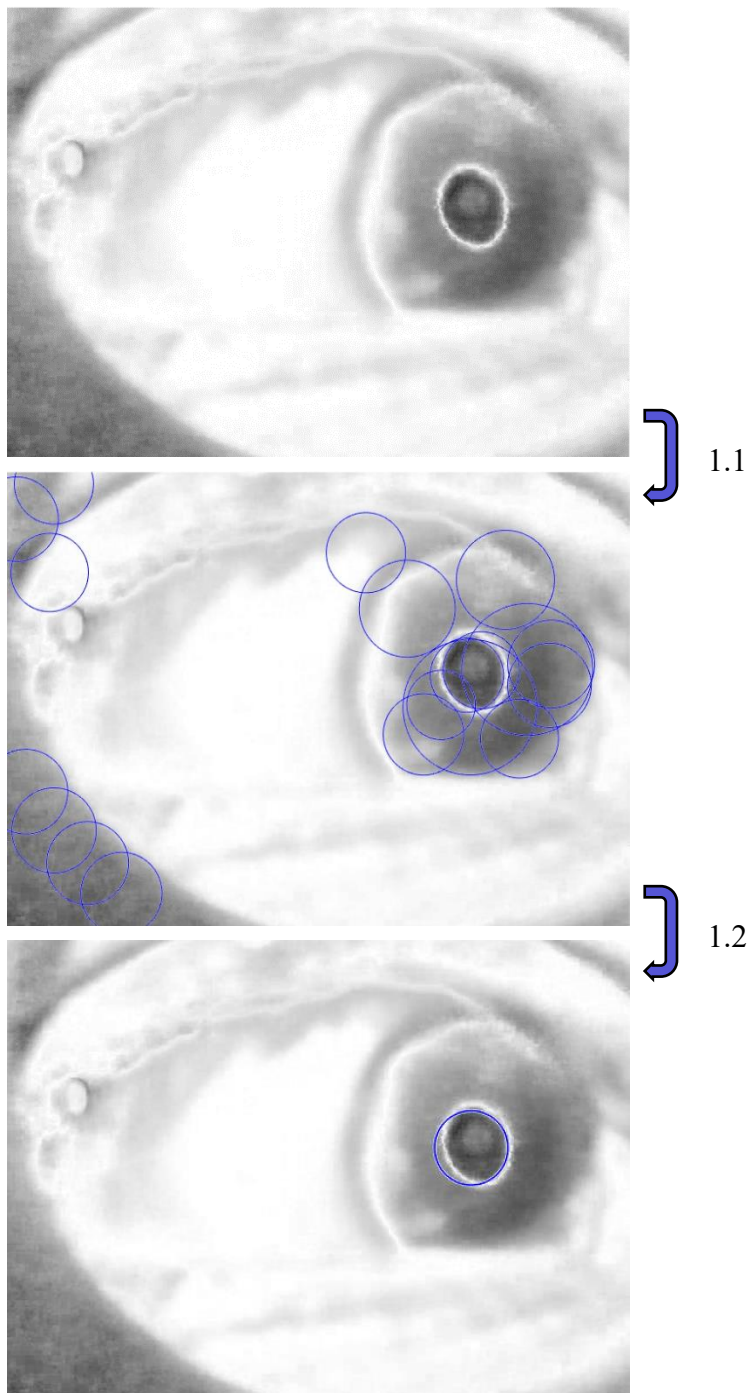


Figura 5.9 – Ilustração do processo de detecção da pupila: Fase 1.

- 1.1 Utilização da função *imfindcircles()* na imagem pré-processada com um critério de elevada sensibilidade;
- 1.2 Escolha do círculo correto através de critérios de continuidade de precisão de distância e raio, relativamente ao objeto identificado nas *frames* anteriores;

De modo a garantir a correta identificação dos limites entre a íris e a pupila existe uma segunda fase, em que se utiliza o centro da pupila encontrada pela primeira aproximação para se analisar a região envolvente. A partir do centro e do raio da pupila descobertos na primeira fase, seleciona-se uma janela que contém parte da íris e a pupila na sua totalidade. Várias linhas que contêm parcialmente íris e atravessam a pupila, são analisadas relativamente à intensidade dos píxeis, de modo a perceber onde existe uma queda abrupta, isto é, qual o limite onde acaba a íris e começa a pupila (Figura 5.12, 2.1).

Na Figura 5.10 podemos observar que para cada diagonal analisada, se detetam dois limites entre a íris e a pupila.

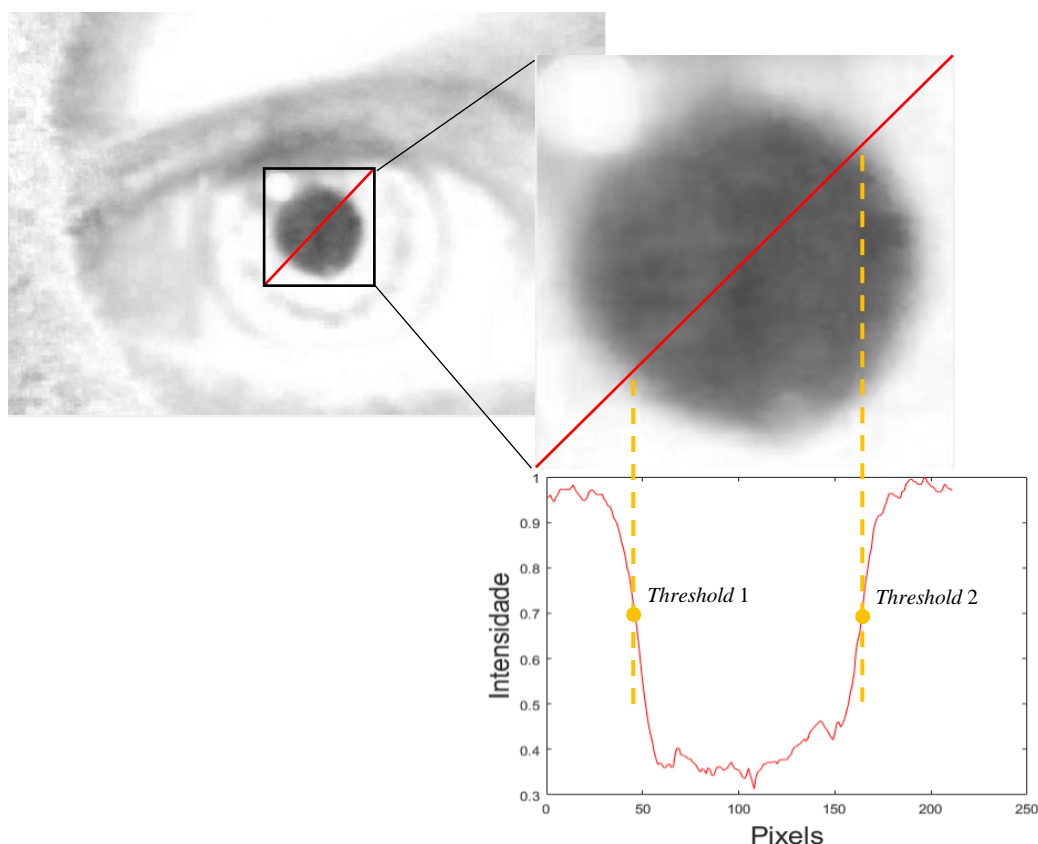


Figura 5.10 - Exemplo do processo de deteção dos limites íris-pupila para uma diagonal principal.

Os *thresholds* representados são calculados separadamente, isto é, não possuem obrigatoriamente o mesmo valor de intensidade absoluta, de modo a evitar que ocorram erros nas zonas em que a iluminação LED contamina a imagem. Os *thresholds* foram calculados como sendo o valor de 50% da intensidade dos píxeis, uma vez que este valor permite uma boa aproximação aos limites íris-pupila.

Para o primeiro *threshold* utiliza-se apenas a primeira metade dos valores de intensidade dos píxeis ao longo da linha e para o segundo utiliza-se apenas a última. Na Figura 5.11 pode compreender-se a razão pela qual os *thresholds* devem ser calculados tendo em conta valores de intensidades máxima e mínima diferentes.

5.2 SEGMENTAÇÃO DA PUPILA – ALGORITMO

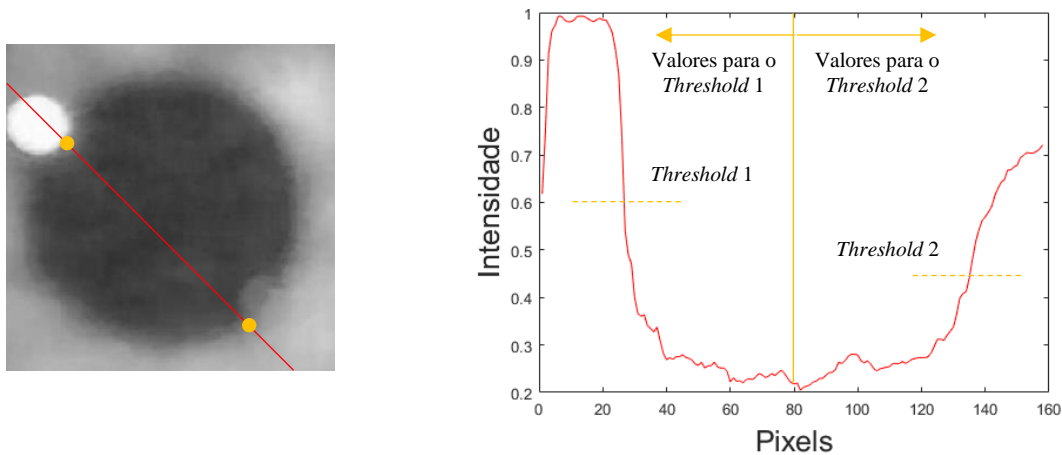


Figura 5.11 – Representação da detecção dos limites íris-pupila numa região com reflexão de luz.

Como se pôde observar, a primeira zona da linha é bastante mais clara devido à reflexão da luz e, assim sendo, o *threshold* correspondente é calculado com um valor máximo bastante mais elevado que o outro. Na segunda metade da linha faz sentido que o *threshold* não seja tão elevado uma vez que o contraste entre a íris e a pupila também não é tão alto. Mesmo que o ponto obtido na zona de reflexão de luz não esteja correto, este é posteriormente eliminado, como veremos a seguir, e, deste modo, não propaga o erro para o segundo limite detetado.

Durante este processo, 38 linhas são analisadas o que corresponde a 76 limites íris-pupila detetados (Figura 5.12, 2.2). Como vimos na figura anterior, devido por exemplo a obstruções da pupila com reflexões de luz, alguns destes limites podem não ser bem calculados.

Para eliminar os pontos incorretos calcula-se a distância de todos os pontos ao centro calculado na primeira aproximação. Uma vez que a grande maioria dos pontos são corretamente identificados, ao escolher-se a mediana destas distâncias garante-se que se está a escolher corretamente um dos limites. Os pontos que não obedecerem a um critério de proximidade do centro – desvio da distância mediana menor a 15 píxeis – são excluídos (Figura 5.12, 2.3). O valor escolhido como critério de exclusão de limites incorretos pode também eliminar alguns limites corretos, uma vez que a pupila tem forma elíptica e, por isto, nem todos os limites distam exatamente o mesmo do centro. No entanto, dado que são detetados muitos limites, é preferível garantir a eliminação de todos os pontos incorretos, mesmo que isso signifique a perda de alguns pontos corretos. Assim, garante-se o melhor ajuste possível dos limites detetados a uma elipse. Para fazer este ajuste recorre-se à função *fit_ellipse()* do *Matlab*. Esta função necessita apenas de 5 pontos, não necessariamente equidistantes, para fazer o ajuste à elipse e retorna o centro da elipse, bem como os diâmetros dos seus dois eixos, e a sua orientação em radianos (Figura 5.12, 2.4). Nesta dissertação considerou-se o valor do diâmetro do maior eixo da elipse como diâmetro pupilar. Esta escolha foi feita porque apenas foram estudados casos de estímulo externo, onde o indivíduo fixa o seu olhar em frente. Assim, a pupila toma sempre uma forma aproximadamente esférica, pelo que os diâmetros dos dois eixos são aproximadamente iguais, sendo então pouco relevante o eixo considerado. Em casos que o sujeito desvie o olhar, deverá considerar-se a média dos diâmetros dos dois eixos como diâmetro pupilar.

Na Figura 5.12 podemos observar a segunda fase do processo de detecção da pupila para uma *frame*.

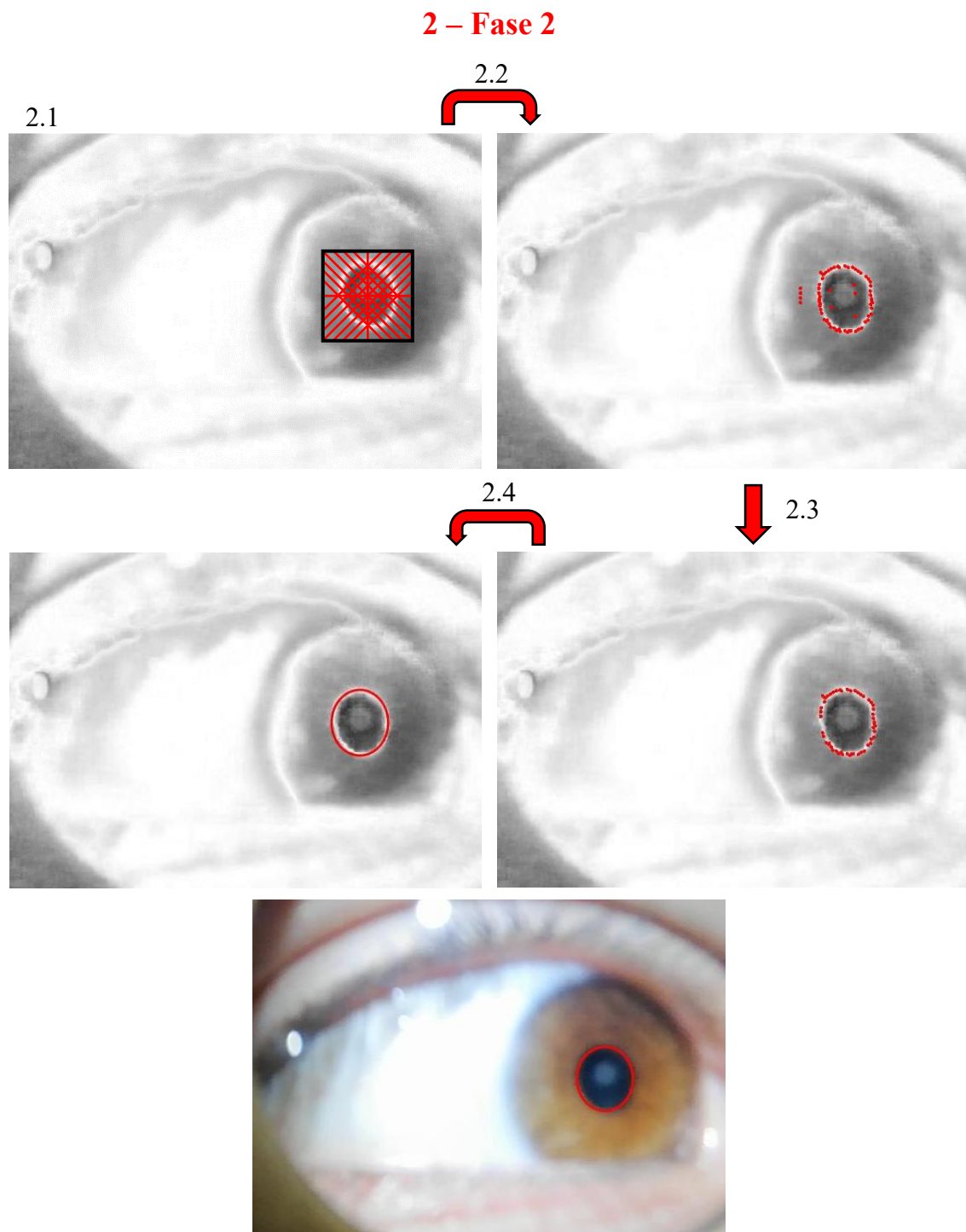
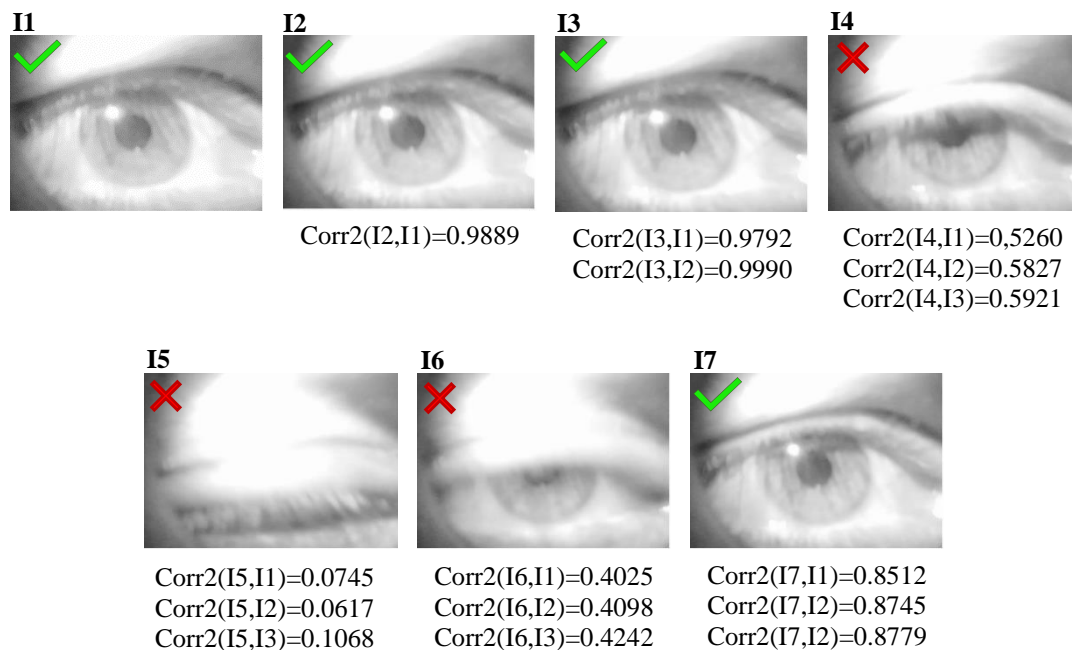


Figura 5.12 – Ilustração do processo de detecção da pupila: Fase 2.

- 2.1 Linhas traçadas ao longo de uma matriz contendo a pupila e parte da íris;
- 2.2 Todos os pontos detetados a partir das linhas e do cálculo dos *thresholds*;
- 2.3 Eliminação dos pontos incorretamente detetados;
- 2.4 Elipse detetada a partir dos pontos corretos recorrendo à função *fit_ellipse()*;

5.2 SEGMENTAÇÃO DA PUPILA – ALGORITMO

Para prevenir que sejam processadas *frames* correspondentes a momentos em que o utilizador pisque os olhos, é realizado um teste de correlação da imagem atual com as 3 imagens anteriores. Antes de se processar qualquer imagem é verificada se esta mantém uma correlação igual ou superior a 0.7, com as três *frames* anteriores, caso contrário passa-se à *frame* seguinte até voltar a existir uma correlação elevada com uma destas últimas *frames* processadas. Esta correlação é efetuada mais uma vez através da função *corr2()* do *Matlab*. Neste caso, esta função compara todos os píxeis de duas imagens, desde que estas sejam representadas com apenas uma matriz, isto é, binarizadas ou convertidas para escala de cinzentos. Neste algoritmo utilizou-se as imagens convertidas de RGB para escala de cinzentos para realizar a correlação. O valor do limiar (0.7) foi escolhido por forma a impedir as *frames* correspondentes a momentos de pestanejar de serem processadas, mas considerar as *frames* onde o utilizador muda a direção do olhar. Na Figura 5.13 pode observar-se uma sequência de *frames* onde o utilizador pestanejou, bem como os valores de correlação entre as imagens.



✗ - *Frame* não processada.

✓ - *Frame* processada.

Figura 5.13 – Representação da sequência de *frames* onde existe um pestanejar dos olhos e valor do coeficiente de correlação entre elas.

Nestes momentos, onde existe pestanejar de olhos, são retiradas cerca de 6 frames, que depois de observadas, conclui-se que correspondem, na grande maioria, a situações em que um observador treinado o teria feito também.

5.3 Interface de Análise de Dados

A interface de análise de dados foi desenvolvida através da aplicação GUI – *Graphical User Interfaces* do *Matlab*. Aqui o utilizador pode carregar o vídeo resultante da aplicação ‘EyeDare’ que quer analisar e ter acesso aos resultados. Na Figura 5.14 pode observar-se a apresentação da interface e, mais detalhadamente, o painel de opções do utilizador.

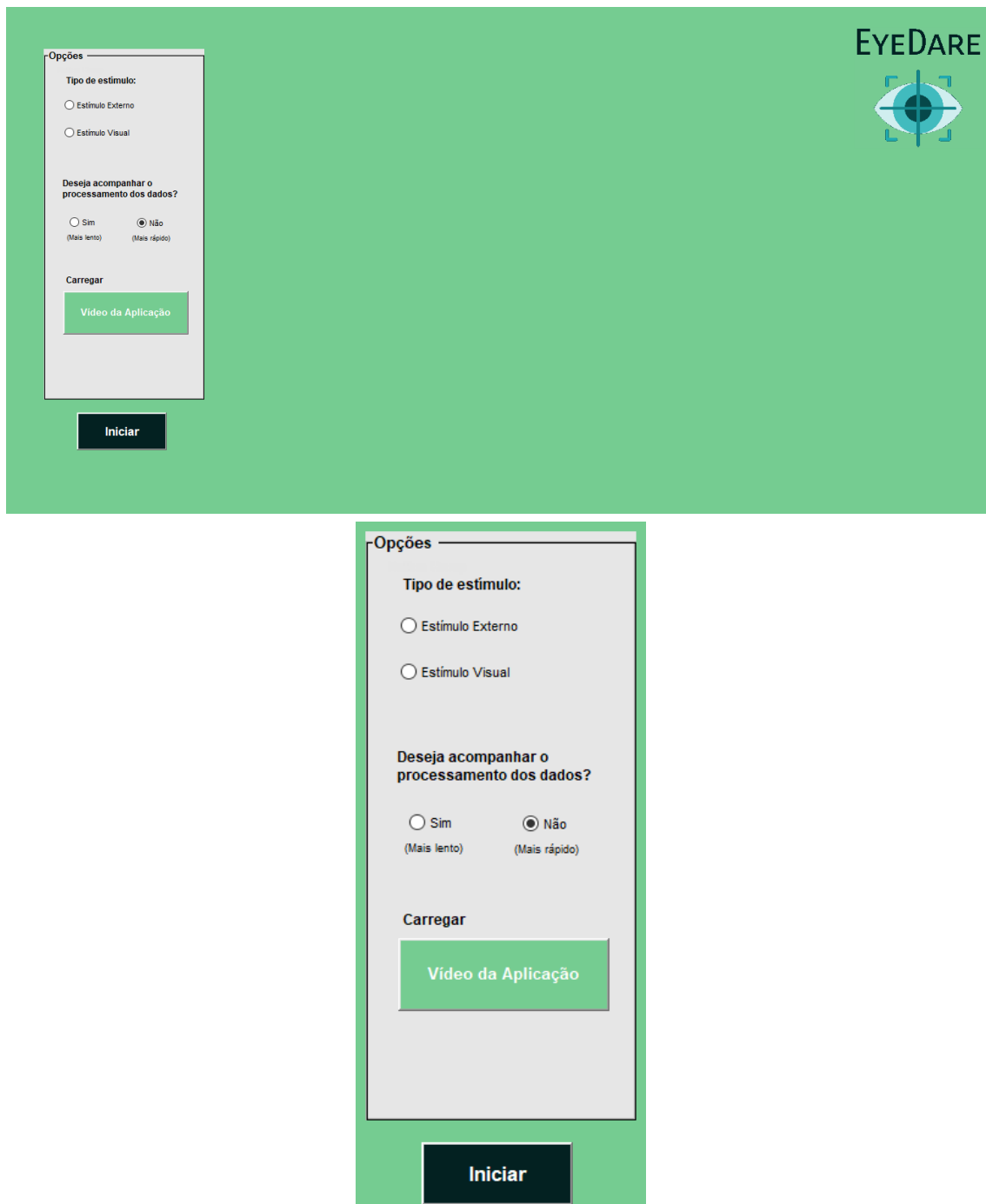


Figura 5.14 – Imagens da entrada na interface de análise de dados e painel de opções do utilizador.

5.3 INTERFACE DE ANÁLISE DE DADOS

Como observado, antes de iniciar o processamento dos dados, o utilizador tem de escolher o tipo de estímulo – externo ou visual - que foi aplicado durante a recolha destes. Caso seja escolhido o estímulo visual, será aberta uma janela de acesso ao armazenamento do computador para seleccionar a imagem ou vídeo utilizado como estímulo. De seguida, decide-se se o processamento de dados será mostrado na interface, isto é, se o utilizador deseja acompanhar a deteção da pupila feita em cada *frame*, durante o processamento de todo o vídeo. É também dada a informação que caso o utilizador escolha acompanhar o processamento dos dados, a análise dos dados será mais lenta, uma vez que a representação de cada *frame* através da utilização da função *imshow()* do *Matlab* aumenta consideravelmente o tempo de processamento. Finalmente, carrega-se o vídeo que se pretende processar e inicia-se a análise deste.

A Figura 5.15 ilustra a interface durante o processamento dos dados, tendo sido escolhido as opções de estímulo externo e de acompanhamento do processamento de dados.

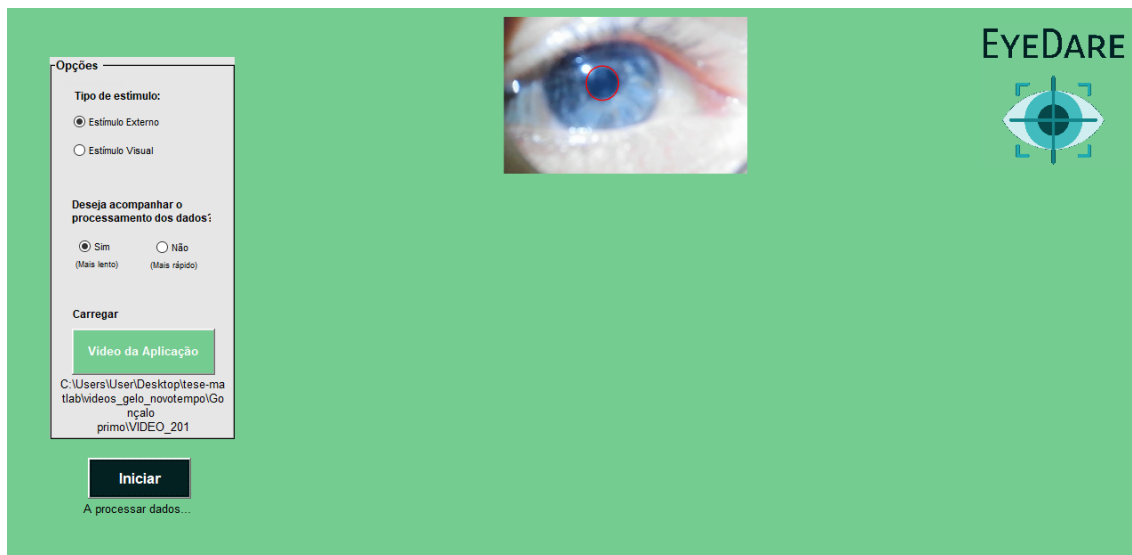


Figura 5.15 – Imagem da interface durante o processamento dos dados.

Por fim, são apresentados os resultados ao utilizador através de um gráfico da variação dos diâmetros pupilares, em píxeis, ao longo do tempo. No caso ilustrado na Figura 5.16 , uma vez que é um caso de estímulo externo em que o vídeo foi acompanhado por uma marcação verbal do início e fim de estímulo, são também apresentados no gráfico esses instantes, bem como alguns outros parâmetros de interesse, que veremos mais à frente.

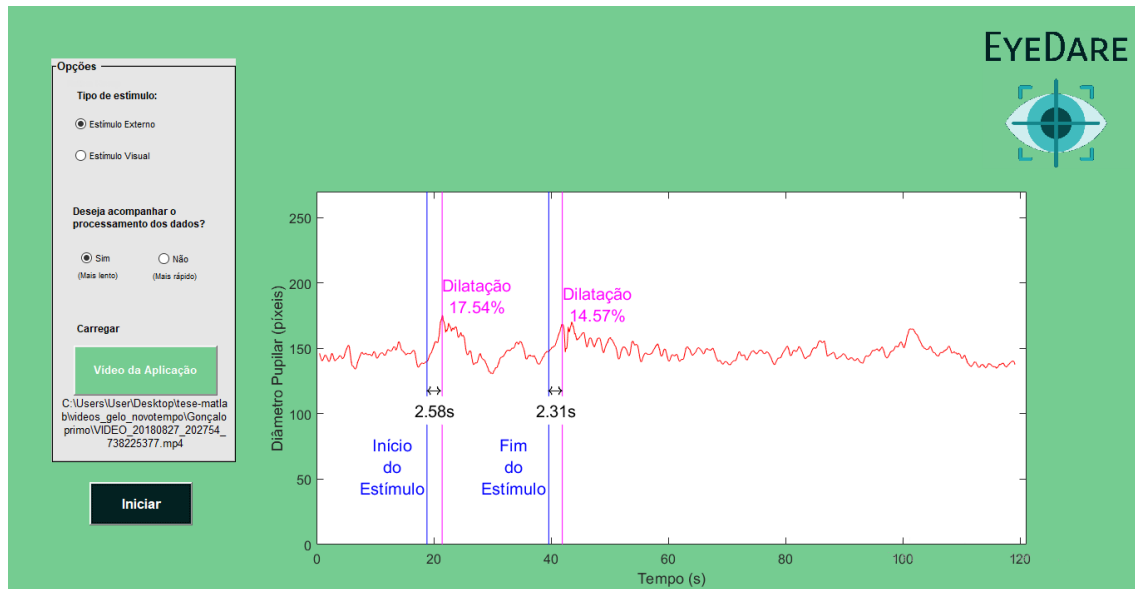


Figura 5.16 – Imagem da interface na apresentação de resultados.

5.4 Estudo de Pupilometria com Estímulo Frio

Após o desenvolvimento do pupilómetro realizou-se um estudo sobre a reação do sistema nervoso autónomo a um estímulo frio, através das variações pupilares dos indivíduos.

5.4.1 Caracterização da Amostra

Foram efetuadas recolhas a 13 indivíduos saudáveis entre os 22 e 25 anos. No entanto, apenas se consideraram 12, devido a um dos indivíduos não ter cumprido completamente o protocolo experimental. Das 12 pessoas consideradas, duas têm a mão esquerda como dominante, o que corresponde a aproximadamente 0.17% de esquerdinos e 0.83% de destros na amostra. Neste estudo optou-se pela mão esquerda para submergir na água, de modo a deixar a mão direita livre para carregar no botão do *cardboard*, uma vez que este se encontra também no lado direito. Assim os indivíduos ficam aptos para avançar as etapas necessárias à aplicação. 8 dos participantes têm os olhos castanhos (cor escura), 2 têm os olhos verde acastanhado (cor intermédia) e 2 têm os olhos azuis/verdes (cor clara). A amostra é então constituída por 66.67% de sujeitos com olhos escuros, 16.67% com olhos de cor intermédia e, novamente, 16.67% com olhos claros.

5.4.2 Procedimento Experimental:

O protocolo experimental foi desenvolvido através das seguintes etapas:

Etapas 1: Colocação do *cardboard* no indivíduo, preso à cabeça com a fita;

Etapas 2: Calibração de 10 segundos;

Etapas 3: Estímulo, dividido em:

- 20 segundos de medição basal (sem estímulo)
- 20 segundos com a mão esquerda submersa em água com gelo, a aproximadamente 5°C (com estímulo);

5.4 ESTUDO DE PUPILOMETRIA COM ESTÍMULO FRIO

- 80 segundos de recuperação (sem estímulo).

A etapa de estímulo tem então uma duração de sensivelmente 2 minutos e inicia-se com um momento de medição basal, seguida da aplicação do estímulo frio e termina com uma fase de recuperação. Durante toda a etapa do estímulo o utilizador encontra-se a olhar em frente, alinhando o seu olhar com a cruz representada na imagem típica do estímulo externo, ilustrada no subcapítulo 5.1.3 .

Os tempos de cada uma destas três fases foram escolhidos de modo a serem suficientes para obter resultados satisfatórios sem comprometer em demasia o conforto da pessoa que realiza o estudo. Verificou-se que 20 segundos com a mão submersa em água fria é o suficiente para analisar as reações do SNA ao choque térmico por via pupilar e é suportável para os participantes do estudo. O tempo de recuperação tem de ser elevado para que a pupila contraia até o seu tamanho normal, isto é, ao seu tamanho antes do estímulo.

Após os 20 segundos de medição basal é dada uma instrução oral ao indivíduo para mergulhar a sua mão dentro da água com o gelo e após os 20 segundos de estímulo é dada outra instrução para o indivíduo a retirar.

5.4.3 Análise de Dados

As instruções orais de início e fim de estímulo determinam os respetivos instantes, permitindo assim calcular-se os tempos de reação do SNA ao estímulo. Estes dois tempos de interesse são retirados da componente de áudio do vídeo recolhido pela aplicação (Figura 5.17).

Notem-se os dois instantes de maior intensidade, correspondendo ao início e fim da aplicação do estímulo frio. Os tempos destes dois picos bem definidos no ficheiro de áudio são encontrados através do processamento do sinal no *Matlab*. Percebe-se então a grande importância de manter um ambiente de silêncio durante a recolha de dados, para que não existam mais picos bem definidos, para além dos desejados.

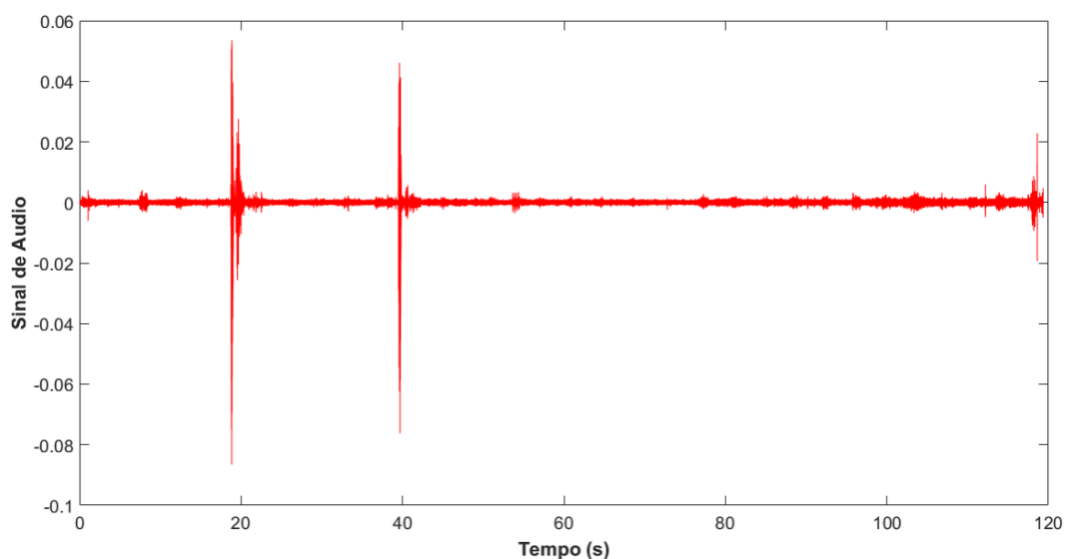


Figura 5.17 - Sinal de áudio retirado do vídeo gravado durante a recolha de dados.

5.4.3.1 Pré-processamento dos Dados Obtidos

Depois de concluída a etapa de processamento do vídeo recolhido, onde é feita a deteção da pupila para todas as *frames*, obtém-se como resultado o diâmetro pupilar em função do tempo. O tratamento destes dados consiste em duas etapas simples. Na primeira é feita uma interpolação dos pontos para repor os valores das *frames* não processadas, devido a momentos de pestanejar dos olhos. Na segunda fase, faz-se um filtro de suavização dos dados, utilizando a função *smooth()* do *Matlab*, com o intuito de eliminar as componentes associadas a ruído. Na Figura 5.18, pode observar-se os dados sem qualquer tipo de processamento, isto é, tal como são obtidos do processamento do vídeo, e também o sinal pré-processado. Os sinais encontram-se sobrepostos para melhor se visualizar as diferenças entre eles.

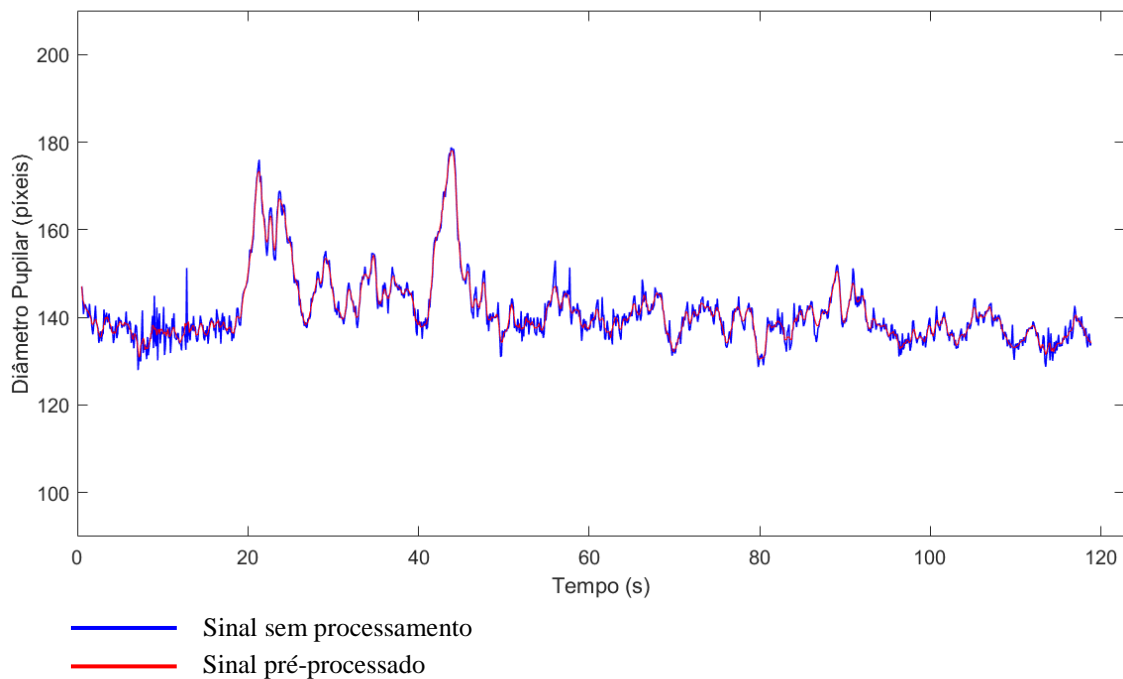


Figura 5.18 – Sinais de variação do diâmetro pupilar com o tempo, não processado (azul) e pré-processado (vermelho).

5.4.3.2 Cálculo de Parâmetros de Interesse

Como descrito acima, para cada indivíduo é realizado o processamento do vídeo da recolha de dados, onde se obtém o diâmetro pupilar para cada *frame*, o processamento do áudio gravado durante o mesmo vídeo, e o pré processamento dos dados obtidos. Após todas estas fases de análise de dados, procede-se ao cálculo de quatro parâmetros de interesse: os tempos de reação do sistema nervoso autónomo ao início e ao fim do estímulo (TR_i e TR_f) e a percentagem de dilatação pupilar (D_i e D_f), dada pelo aumento do diâmetro pupilar, que ocorreu também nestes dois instantes.

Os tempos de início e fim de estímulo são extraídos do ficheiro de áudio, como referido anteriormente. Os tempos correspondentes aos picos de dilatação máxima são obtidos através da

5.4 ESTUDO DE PUPILOMETRIA COM ESTÍMULO FRIO

função *findpeaks()* do *Matlab* que retorna todos os picos do sinal, isto é, os pontos onde a derivada é nula, e a concavidade é voltada para baixo. Tendo todos os picos do sinal, escolhe-se o mais alto numa janela de 5 segundos após os tempos de início e fim do estímulo. Através da subtração do instante do pico de dilatação máxima e do tempo retirado do ficheiro de áudio obtém-se o tempo de reação do SNA ao estímulo.

Para calcular a percentagem do aumento do diâmetro pupilar, recorre-se à seguinte expressão:

$$\% \text{ Dilatação} = \frac{d_{\text{máx}} - d_{\text{min}}}{d_{\text{máx}}} \times 100$$

Onde $d_{\text{máx}}$ corresponde ao diâmetro no instante do pico de dilatação máxima (obtido anteriormente), e d_{min} corresponde ao diâmetro médio até ao momento antes do início da dilatação. Recorreu-se ao diâmetro médio em vez do valor exato no momento de início/fim de estímulo, de modo a não obter resultados que fossem influenciados pela fase do *hippus* pupilar em que a pupila se encontra, isto é, se nestes instantes a pupila se encontrava a contrair ou a dilatar. De seguida, na Figura 5.19, encontra-se um exemplo para melhor entender o cálculo destas percentagens.

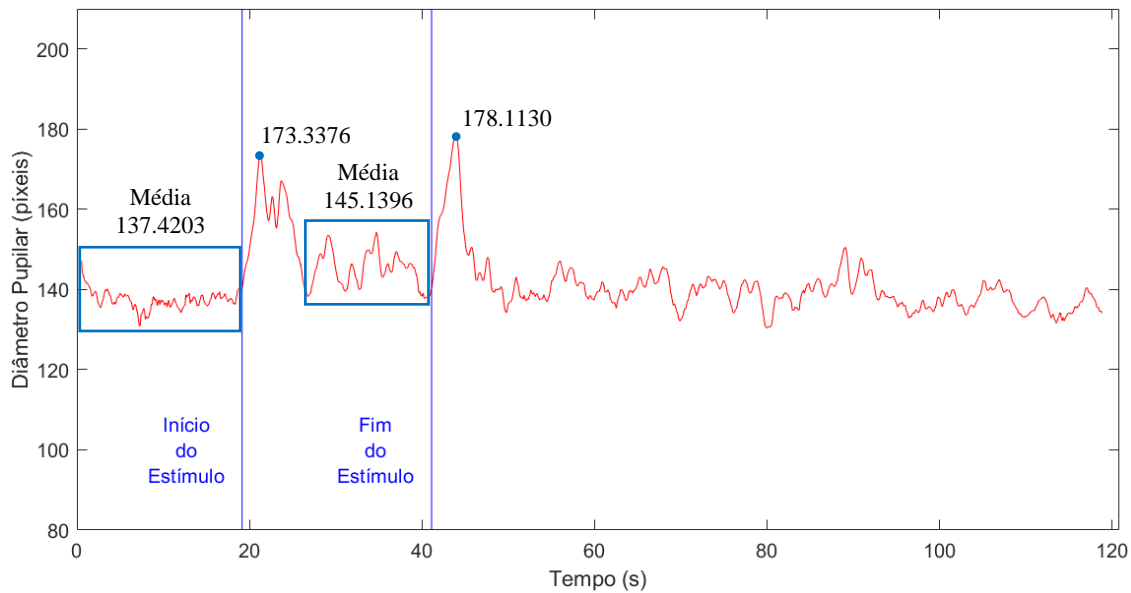


Figura 5.19 – Sinal de variação do diâmetro pupilar com o tempo e valores de diâmetro, em pixels, necessários ao cálculo da percentagem de dilatação pupilar.

Calcula-se então as duas percentagens de dilatação pupilar, segundo os valores da Figura 5.19:

$$\% \text{ Dilatação}_{\text{início de estímulo}} = D_i = \frac{173.3376 - 137.4203}{173.3376} \times 100 \approx 20,72\%$$

$$\% \text{ Dilatação}_{\text{fim de estímulo}} = D_f = \frac{178.1130 - 145.1396}{178.1130} \times 100 \approx 18,51\%$$

CAPÍTULO 5. MÉTODOS

Após o cálculo destes parâmetros, estes são posteriormente apresentados na interface ao utilizador, estando sobrepostos ao gráfico, como se pode ver na Figura 5.20.

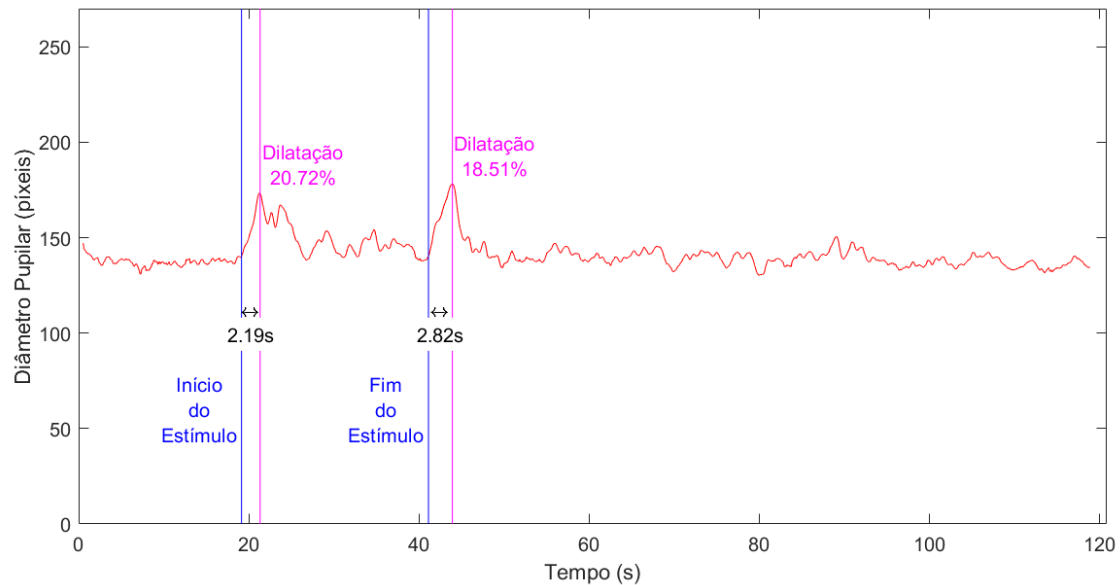


Figura 5.20 - Apresentação do resultado final do processamento dos dados, que inclui os parâmetros de interesse.

5.4.3.3 Estudo de Frequências

Foi também realizado um pequeno estudo sobre a frequência pupilar ao longo de toda a aquisição, de modo a perceber como esta é alterada pelo SNA aquando de um estímulo frio. Este estudo foi realizado através do espectrograma do sinal de variação pupilar dos indivíduos ao longo do tempo. O espectrograma foi efetuado através da função *spectrogram()* do *Matlab*. Numa primeira fase avaliou-se o espectrograma de cada um dos indivíduos, e de seguida realizou-se a média dos espectrogramas de todos os indivíduos, alinhando os momentos de início de estímulo, para evidenciar as intensidades de frequências comuns aos indivíduos nos períodos de interesse. Estes resultados, bem como os obtidos através da metodologia descrita acima, encontram-se no próximo capítulo.

RESULTADOS

O funcionamento global do sistema de pupilometria desenvolvido pode ser avaliado através dos resultados do estudo de pupilometria a estímulo frio realizado. Assim, se o sinal obtido estiver de acordo com o esperado e se os resultados do estudo estiverem coerentes com a realidade, à partida, o sistema de pupilometria tem um funcionamento adequado às aplicações a que se destina.

Os gráficos do sinal de variação do diâmetro pupilar em função do tempo, resultantes de todos os 12 participantes do estudo de pupilometria a gelo podem ser consultados no Apêndice A.

6.1 Parâmetros de Interesse

Como referido no capítulo anterior, os parâmetros de interesse extraídos dos sinais obtidos correspondem ao aumento percentual do diâmetro pupilar no início e no fim do estímulo (D_i e D_f) e aos tempos de reação do sistema nervoso autónomo a esses dois instantes (TR_i e TR_f). Na Tabela 6.1 apresenta-se os resultados referentes a estes parâmetros, para cada sujeito (S_1, S_2, \dots, S_{12}), bem como as médias (\bar{x}) e desvios padrão (σ) associados.

Foi ainda calculada a velocidade média com que o diâmetro da pupila chega ao pico de dilatação máxima correspondente ao início e ao fim do estímulo. Este parâmetro é dado através da derivada da dilatação pupilar em ordem ao tempo ou, de maneira mais simples e aplicando a expressão apenas aos momentos de interesse, é dada através da expressão $\bar{V} = \frac{\bar{D}}{TR}$. Estes resultados e a respetiva incerteza associada (δV), calculada através do princípio de propagação de incertezas, encontram-se na Tabela 6.2.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Tabela 6.1 - Resultados do estudo de pupilometria a estímulo frio: percentagens de dilatação pupilar e tempos de reação no início e fim de estímulo para cada sujeito, e respetivas médias e desvios padrão.

	Dilatação pupilar (%)		Tempos de reação (s)	
	Início do estímulo (D_i)	Fim de estímulo (D_f)	Início do estímulo (TR_i)	Fim de estímulo (TR_f)
S_1	20.72	18.51	2.19	2.82
S_2	15.76	5.77	2.88	1.83
S_3	21.45	14.17	3.00	3.18
S_4	20.63	14.43	3.51	2.89
S_5	17.54	14.57	2.58	2.31
S_6	23.36	8.51	1.68	2.27
S_7	24.07	18.81	3.74	3.34
S_8	18.76	13.98	2.34	2.77
S_9	13.14	7.31	2.01	3.11
S_{10}	17.49	9.42	3.15	2.28
S_{11}	24.20	15.48	2.28	2.01
S_{12}	18.30	6.71	3.30	2.61
\bar{x}	19.62	12.31	2.72	2.62
σ	3.3	4.4	0.61	0.46

Tabela 6.2 – Velocidade de dilatação pupilar no início e no final do estímulo e incerteza associada.

	Início do estímulo	Fim de estímulo
V (%/s)	7.2	4.7
δV (%/s)	0.67	1.5

6.2 Frequências dos Sinais

As frequências dos sinais obtidos foram estudadas através do espectrograma associado a cada sujeito. Um espectrograma mostra a intensidade com que determinada frequência está presente num determinado instante. Como concluído no capítulo anterior, as frequências existentes nos sinais são bastante menores que 5 Hz, pelo que o espectrograma completo não fornece grande informação. No entanto, se ampliarmos o eixo das frequências nas baixas frequências nota-se as variações destas ao longo de toda a aquisição. A Figura 6.1 ilustra um exemplo de um espectrograma, com o eixo da frequência completa e com este ampliado nas frequências de maior intensidade no sinal. As linhas azuis verticais representam o início e o fim do estímulo.

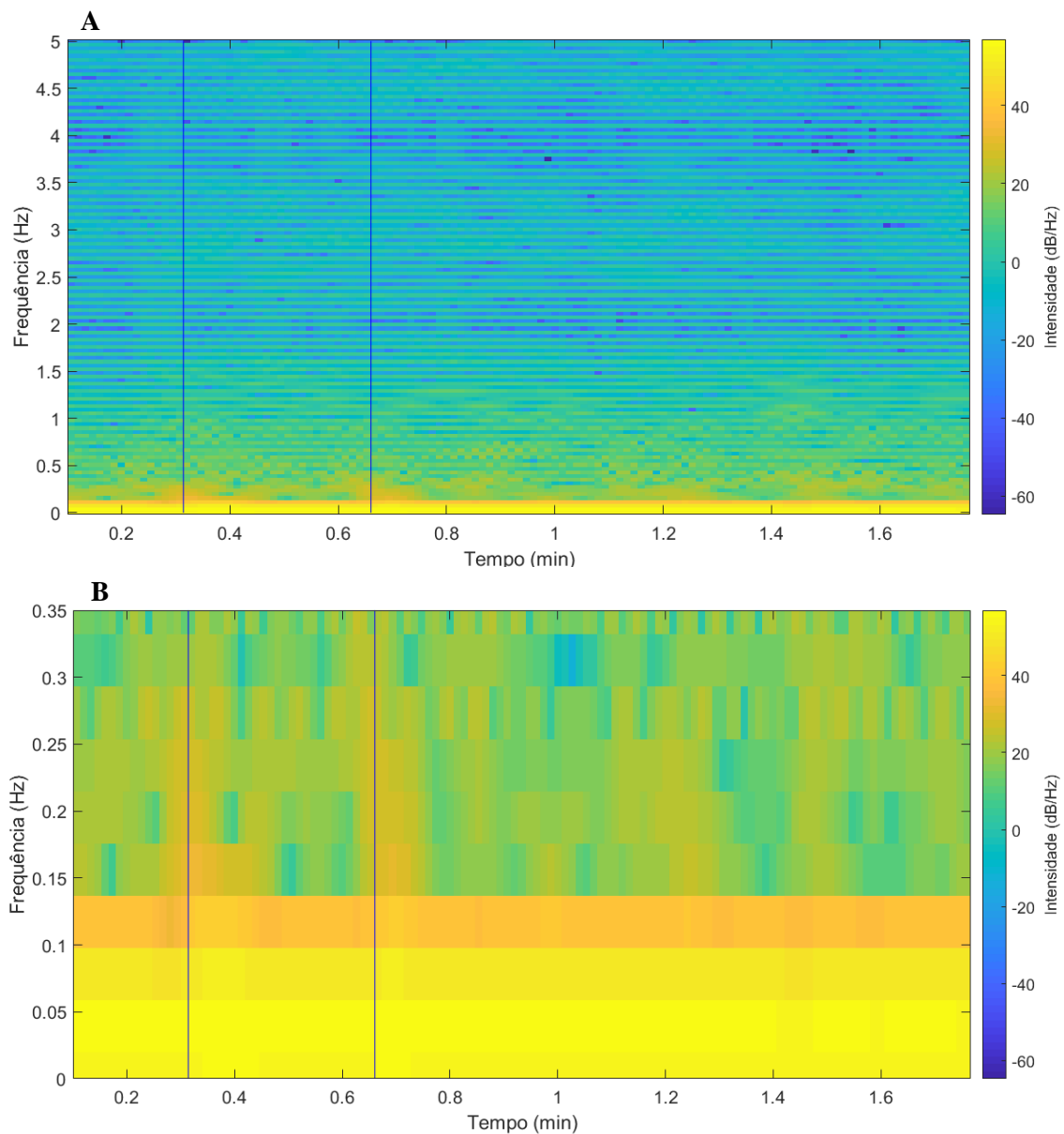


Figura 6.1 – Espectrograma, pertencente ao sujeito 11 (S_{11}). A: escala da frequência completa. B: escala da frequência ampliada nas baixas frequências. Linhas azuis verticais: marcação de início e fim de estímulo.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Note-se a diferença de intensidades nas gamas de frequências entre 0.05 e 0.3 Hz no momento do início do estímulo. Isto acontece para a maioria dos participantes neste estudo, havendo também, ainda que menor, uma predominância na mesma gama de frequências no momento do final do estímulo, como se pode observar pelos restantes espectrogramas presentes no Apêndice B.

De modo a poder analisar estas variações em todos os indivíduos, calculou-se o espectrograma médio, sendo que se alinhou os inícios de estímulo de todos os sujeitos quando se realizou o cálculo. Na Figura 6.2 pode observar-se que, de facto, existe uma predominância de frequências mais baixas, numa gama de 0.05-0.3 Hz, no momento em que o sujeito coloca a mão dentro de água. Pode também visualizar-se este fenómeno, ainda que menos evidente, no momento em que o indivíduo retira a mão da água, que é aproximadamente aos 0.7 minutos (40 segundos). A linha azul vertical representada no espectrograma corresponde ao início do estímulo, onde foram centrados os espectrogramas de todos os sujeitos.

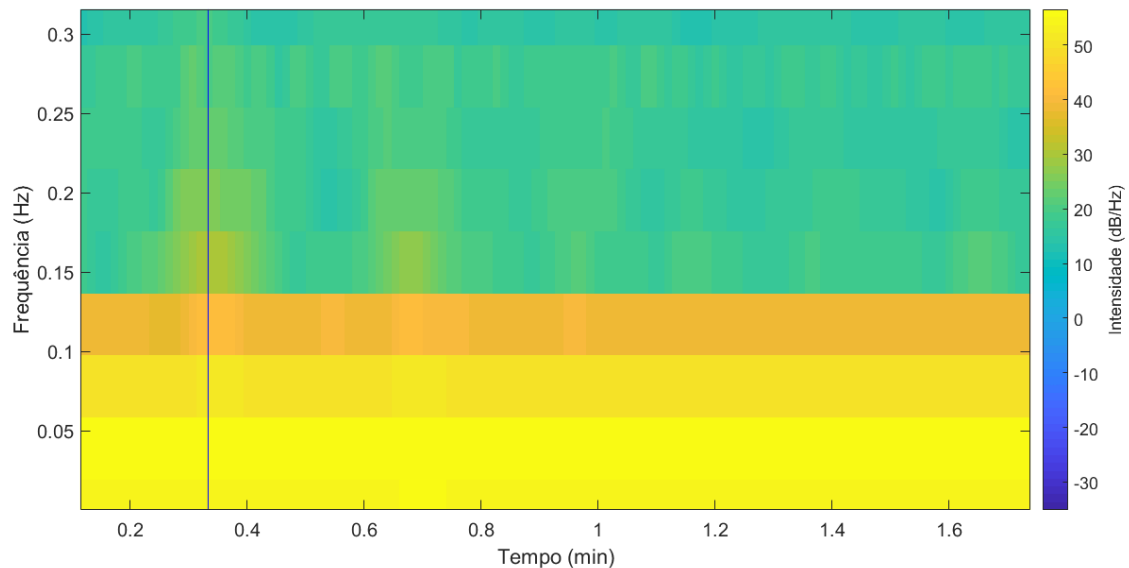


Figura 6.2 - Espectrograma médio de todos os sujeitos. Linha azul: início de estímulo.

DISCUSSÃO

7.1 Análise Geral dos Resultados Obtidos

Como explicado no subcapítulo 3.3.1, quando a mão de uma pessoa é submersa em água fria, a atividade simpática é ativada como resposta a uma situação de desregulação térmica e de dor. Com este aumento da atividade simpática, e com a inibição da atividade parassimpática, a pupila inicia a sua dilatação de imediato (Figura 7.1, 2). Passados alguns segundos de o indivíduo ter a mão submersa na água (tempo de reação TR_I), dá-se a dilatação pupilar máxima. Após este pico (Figura 7.1, 3), existe uma habituação à temperatura e a pupila fica menos dilatada. Nesta fase volta então a existir atividade parassimpática, uma vez que, para além da diminuição do diâmetro, voltam a existir ciclos de contração e dilatação pupilares. Em todo este período, a pupila encontra-se mais dilatada do que no instante basal (Figura 7.1, 1), o que sugere que a atividade simpática é predominante relativamente à parassimpática. Este facto vai ao encontro do esperado, uma vez que, enquanto o indivíduo mantiver a mão na água fria, são desencadeadas respostas de termorregulação pelo SNAS. Quando a pessoa retira a mão da água (Figura 7.1, 4), verifica-se que a atividade simpática é outra vez intensificada resultando numa nova dilatação pupilar acentuada, ainda que menos intensa que no início do estímulo. Esta intensificação decorre como resposta ao choque térmico, desta vez do frio para a temperatura ambiente. É de esperar que a atividade simpática seja mais intensa relativamente à parassimpática até a mão atingir uma determinada temperatura à qual não sejam necessárias mais respostas que visem o aumento da temperatura corporal. Ao longo do tempo pós-estímulo (Figura 7.1, 5), pode observar-se uma diminuição gradual do diâmetro da pupila. Este período pode então ser considerado como uma recuperação da temperatura normal da mão, e por isto, do balanço normal da atividade simpática e parassimpática.

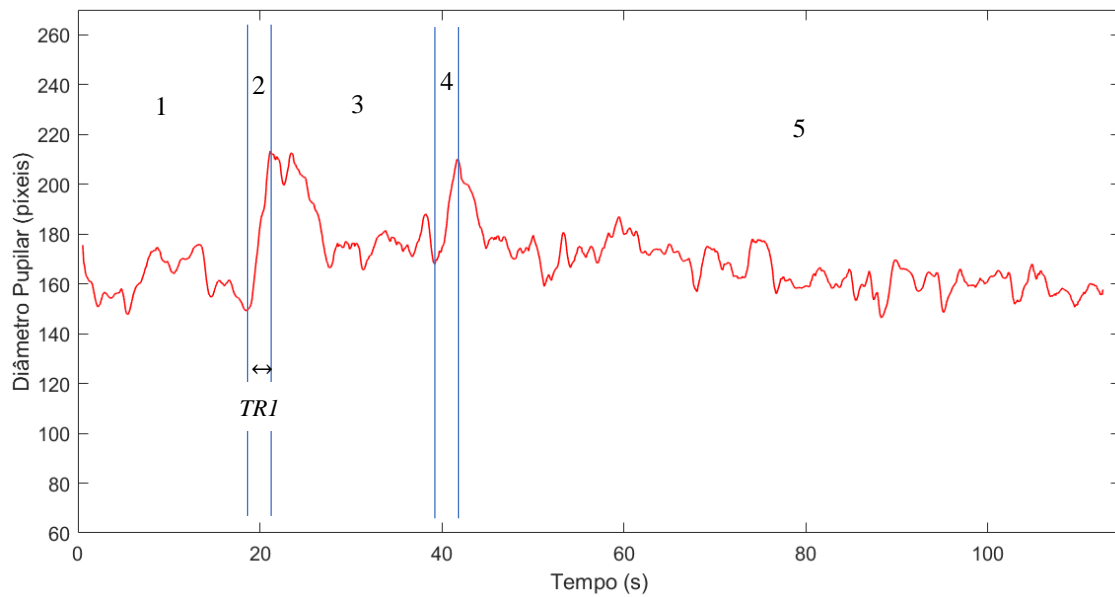


Figura 7.1 - Sinal de variação do diâmetro pupilar com o tempo do S_{II} .

- 1: tempo de medição basal, pré-estímulo;
- 2: tempo desde o início do estímulo ao pico de máxima dilatação pupilar (TR_1);
- 3: tempo durante o estímulo;
- 4: tempo desde o fim do estímulo ao pico de máxima dilatação pupilar;
- 5: tempo de recuperação.

7.2 Variação Percentual do Diâmetro Pupilar

Como observado no capítulo anterior, a média da variação percentual do diâmetro pupilar no início do estímulo foi de $[19.62 \pm 3,3]$ %, sendo que as variações pupilares se encontram numa gama de $[13.14, 24.20]$ %. Para melhor se imaginar estas variações percentuais, apresenta-se de seguida a Figura 7.2 que ilustra a pupila a sofrer um aumento no seu diâmetro de cerca do valor médio: 19%.

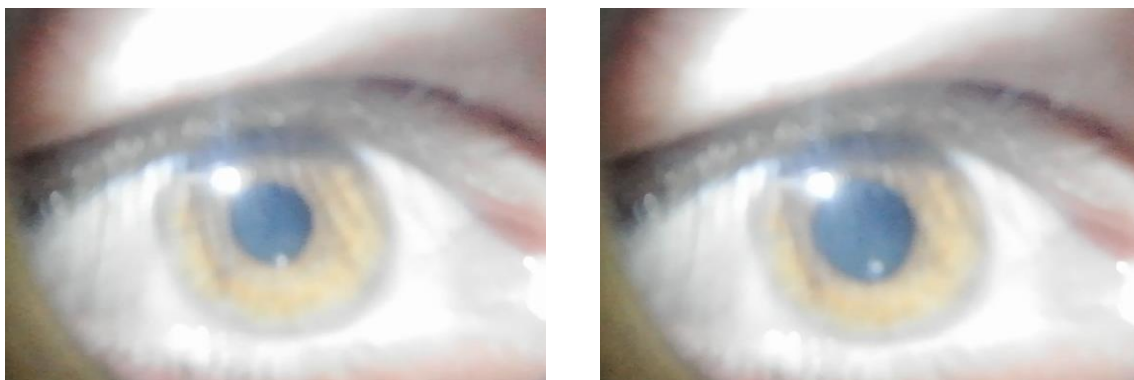


Figura 7.2 – Representação de uma dilatação de 19% do diâmetro pupilar.

7.3 TEMPOS DE REAÇÃO PUPILAR

No final do estímulo, a média da dilatação pupilar foi menor: $[12.31 \pm 4.4] \%$. A gama de valores é mais díspar e encontra-se entre $[5.77, 18.81] \%$. A maior dispersão destes valores deve-se a nem todos os sujeitos terem dilatações significativas aquando da retirada da mão da água fria.

Comparando os valores percentuais de dilatação obtidos para os momentos de início e fim de estímulo, verifica-se em todos os sujeitos e, por conseguinte, a média é mais elevada no primeiro instante. Note-se que, em alguns sujeitos, a pupila atinge valores de diâmetro superiores no final do estímulo. No entanto, como a pupila já se encontrava mais dilatada nos instantes anteriores, a variação percentual é, em todos os casos, menor neste instante.

A dilatação pupilar ser superior no início do estímulo deve-se a uma maior atuação do sistema nervoso simpático. Isto pode dever-se à existência de mais fatores que estimulam a atividade simpática, nomeadamente a dor e a surpresa sentida aquando do choque térmico. Quando a pessoa retira a mão da água, existe também um choque térmico, mas não está associado a dor, antes pelo contrário, passa-se para uma situação de maior conforto. Este momento não está também associado a surpresa, uma vez que as restantes partes do corpo estão já habituadas à nova temperatura (temperatura ambiente).

Relativamente aos valores percentuais a que se chegou, não se pode comparar com nenhuns outros, pois não foi encontrado nenhum estudo com os mesmos tempos definidos no protocolo experimental. No entanto, sabe-se que a pupila pode variar cerca do dobro do seu diâmetro quando existem condições de luminosidade diferentes [20]. No caso de estímulos luminosos, a atividade simpática é dirigida diretamente à pupila, como meio de regulação da entrada de luz para a retina. Assim, faz sentido que, durante estímulos não luminosos, a variação do diâmetro não seja tão elevada, uma vez que não é necessária a entrada de mais luz para a retina. Considera-se então que, nestes casos, a dilatação ocorre por meio de um epifenómeno, isto é, de um efeito secundário, da ativação do sistema nervoso autónomo.

7.3 Tempos de Reação Pupilar

Os tempos médios de reação pupilar obtidos por ação do SNA ao estímulo foram de $[2.72 \pm 0.61] \text{ s}$ no início do estímulo e $[2.62 \pm 0.46] \text{ s}$ no final deste. Era de esperar que estes dois tempos não diferissem muito, uma vez que ambos resultam de um aumento da atividade simpática.

Sabendo que o tempo de reação pupilar a estímulos luminosos é cerca de 0.2 segundos e a estímulos emocionais e cognitivos varia entre 1 a 3 segundos [20,21], verifica-se que a gama de valores obtida nos dois instantes se equipara aos estímulos emocionais e cognitivos. Estes resultados podem ser explicados novamente pela origem da ativação do sistema nervoso simpático. Em estímulos luminosos é necessário existir uma rápida adaptação pupilar, de modo a regular a chegada de luz à retina. Em estímulos não luminosos, a dilatação e a contração pupilar em nada ajudam a estabilização das condições regulares do corpo. Assim, no que diz respeito ao tempo de reação, pode definir-se um fator comum entre os estímulos emocionais, cognitivos e a frio: não necessitarem de uma resposta pupilar rápida.

7.4 Velocidades de Dilatação Pupilar

Como apresentado no capítulo anterior, o crescimento do diâmetro pupilar ocorre com uma taxa média de $[7.21 \pm 0.67] \text{ \%}/\text{s}$ no início do estímulo, e de $[4.70 \pm 1.55] \text{ \%}/\text{s}$ no final deste. Estes resultados podiam ser antevistos, pelo facto de a variação pupilar ser sempre maior no princípio do estímulo, mas os tempos de reação serem semelhantes nos dois instantes. Por isto, depreende-se que a explicação da diferença dos valores de velocidade obtidos, prende-se com a explicação apresentada para a diferença dos valores de variação percentual do diâmetro pupilar. Pode então associar-se uma taxa de dilatação pupilar menor a menores intensidades da atividade simpática.

7.5 Frequência Pupilar

Como já explicado no subcapítulo 3.3.1, no momento da aplicação do estímulo atua unicamente o sistema nervoso autónomo simpático. Sabe-se também da literatura que o SNAS atua a frequências mais baixas que o SNAP [39].

Através dos espectrogramas obtidos para cada sujeito, observou-se uma clara predominância das frequências mais baixas ($< 0.3 \text{ Hz}$) no momento do estímulo frio. É também visível, ainda que menos notório, esta predominância no momento em que os sujeitos retiram a mão da água. No espectrograma médio de todos os sujeitos (Figura 6.2) é confirmada a tendência geral de uma maior intensidade das frequências baixas aquando do estímulo. Estes resultados vão ao encontro do esperado, uma vez que, com base na literatura, sugerem uma evidente ativação da atividade simpática.

CONCLUSÃO

8.1 Considerações Gerais

No decorrer da presente dissertação implementou-se um algoritmo capaz de detetar as variações do diâmetro da pupila a partir de um vídeo filmado com recurso à câmara frontal de um telemóvel. Verificou-se que este era corretamente calculado e que a taxa de aquisição do vídeo poderia ser reduzida de 30 Hz para 10 Hz, diminuindo o tempo de processamento dos dados sem perder de conteúdo interessante para os estudos a que o equipamento se destina. Os pupilómetros de vídeo monoculares comerciais utilizam taxas de aquisição geralmente entre 5 e 25 Hz, podendo existir equipamentos com taxas muito maiores. Apesar da atividade pupilar funcionar a baixas frequências, ter uma taxa de aquisição elevada permite determinar parâmetros dependentes do tempo com uma maior precisão e examinar a dependência temporal da fase entre o sinal pupilar e outro sinal fisiológico [40]. Assim, se o objetivo de algum estudo que utilize o pupilómetro desenvolvido nesta dissertação se prender com algum destes casos, deverá alterar-se a taxa de processamento do sinal para o seu máximo, isto é, 30 Hz.

Para validar o correto funcionamento do sistema de pupilometria desenvolvido, realizou-se um estudo suplementar a esta tese, que teve também a motivação de melhor compreender o funcionamento do SNA em resposta a um estímulo frio. Apesar de não estar documentado nenhum estudo com o mesmo protocolo experimental, os resultados obtidos demonstraram-se coerentes com os processos fisiológicos esperados neste tipo de estímulo. Assim, pode concluir-se que o pupilómetro desenvolvido apresenta um correto funcionamento, conseguindo medir corretamente as variações pupilares de um indivíduo desde o início até ao final de uma aquisição. Considerando que o custo deste pupilómetro reside apenas no valor comercial do *cardboard* e do circuito luminoso instalado neste (≈ 8 €) verifica-se que este valor fica bastante abaixo de qualquer equipamento de pupilometria a vídeo. Pelos motivos referidos, considera-se então que o objetivo desta dissertação foi cumprido.

A maior limitação deste sistema é a necessidade de existir uma adaptação do algoritmo quando se utilizam diferentes telemóveis. O algoritmo desenvolvido já tem em conta as diferentes posições das câmaras de qualquer telemóvel. Para isto, na primeira *frame* considera-se sempre a imagem completa para a segmentação pupilar. Apenas se limita a área desta deteção nas *frames* seguintes, com base na localização da pupila na primeira *frame*. No entanto, a mudança de resolução e da distância focal da lente da câmara frontal do telemóvel, pode resultar numa incorreta segmentação da área pupilar. Para isto não acontecer, é necessário alterar alguns parâmetros do algoritmo, como por exemplo a gama de raios em que se pretenda que a função *imfindcircles()* detete o objeto circular.

8.2 Trabalho futuro

As alterações estruturais efetuadas ao sistema de *eye tracking* original, realizaram-se sempre em colaboração com o colega Raul Vences [4], trabalho ainda não publicado, de modo manter a mesma base nos dois sistemas. Assim, o rumo mais evidente deste projeto é a fusão entre o pupilómetro e o *eye tracker*, podendo este ser utilizado em conjunto ou separadamente, isto é, apenas como *eye tracker* ou apenas como pupilómetro. Deste modo, abranger-se-ia todas as áreas de aplicação de cada um dos sistemas individuais, bem como áreas que necessitem de informação simultânea sobre os movimentos oculares e as variações de tamanho pupilar, como por exemplo o *neuro-marketing*.

Visto que a medição das variações pupilares é uma boa fonte de conhecimento sobre a atuação dos sistemas nervosos simpático e parassimpático, como trabalho futuro propõe-se também estudos mais profundos nesta área. Seria particularmente interessante um estudo sobre os ciclos de contrações/dilatações naturais da pupila (*hippus* pupilar), na ausência de qualquer estímulo, pois este não é um assunto ainda muito documentado. No estudo realizado não foi possível explorar este campo, uma vez que as frequências associadas a estes ciclos estão na ordem dos 0.04 Hz e, por isto, espera-se que estes se repitam apenas de 25 em 25 segundos. Com os tempos definidos no protocolo experimental, e devido à aplicação do estímulo, não se pôde observar as referidas frequências.

Como trabalho futuro, pode também explorar-se a viabilidade de outro suporte para o telemóvel e de outras fontes de iluminação dos olhos. Sugere-se então que se procure na gama dos suportes de realidade virtual um que seja mais ergonómico e mais resistente, mas sempre com vista a manter um custo reduzido. Dentro das fontes de iluminação, sugere-se a exploração de radiações fora do espectro visível, como por exemplo a infravermelha.

Tendo em conta o desempenho que foi alcançado nesta dissertação com este dispositivo e as melhorias propostas, crê-se que, em breve, se possa disponibilizar um equipamento de muito baixo custo, com características técnicas que permitem tanto avaliações clínicas, por via do estudo do funcionamento do sistema nervoso autónomo, como relacionados com neurociência: atenção, cognição e *neuro-marketing*.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Neuroptics, “The Neurological Pupil Index.” [Online]. Available: <http://www.prospectdiagnostics.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/The-Neurological-Pupil-Index.pdf>. [Accessed: 21-Jan-2018].
- [2] E. H. Hess and J. M. Polt, “Pupil Size as Related to Interest Value of Visual Stimuli,” *Am. Assoc. Adv. Sci.*, vol. 132, no. 3423, pp. 349–350, 2013.
- [3] F. Gamas, “Desenvolvimento de um Eye Tracker de Baixo Custo,” Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2017.
- [4] R. Vences, “Validação e calibração de um eyetracker de baixo custo,” Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2018.
- [5] H. Wilhelm and B. Wilhelm, “Clinical applications of pupillography,” *J. Neuro-Ophthalmology*, vol. 23, no. 1, pp. 42–49, 2003.
- [6] J. S. Tsukahara, T. L. Harrison, and R. W. Engle, “The relationship between baseline pupil size and intelligence,” *Cogn. Psychol.*, vol. 91, pp. 109–123, 2016.
- [7] D. D. Fehrenbacher and S. Djamasbi, “Information systems and task demand: An exploratory pupillometry study of computerized decision making,” *Decis. Support Syst.*, vol. 97, no. 2016, pp. 1–11, 2017.
- [8] R. R. Seeley, C. L. Vanputte, P. Tate, and T. D. Stephens, *Seely’s Anatomy and Physiology Book*, vol. 2, no. 3. 2003.
- [9] B. D. Kels, A. Grzybowski, and J. M. Grant-Kels, “Human ocular anatomy,” *Clin. Dermatol.*, vol. 33, no. 2, pp. 140–146, 2015.
- [10] C. Garhart and V. Lakshminarayanan, “Anatomy of the eye,” *Handb. Vis. Disp. Technol.*, pp. 93–104, 2016.
- [11] P. Artal, “Image Formation in the Living Human Eye,” *Annu. Rev. Vis. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–17, 2015.
- [12] R. Kardon, “Anatomy and Physiology of the Autonomic Nervous System,” *Wash Hoyt’s Clin. Neuro-Ophthalmology*, pp. 649–714, 2005.
- [13] H. D. Critchley, “Neural mechanisms of autonomic, affective, and cognitive integration,” *J. Comp. Neurol.*, vol. 493, no. 1, pp. 154–166, 2005.
- [14] E. R. Kandel, T. M. Jessell, J. H. Schwartz, S. A. Siegelbaum, and A. J. Hudspeth, *Principles of Neural Science*, 5th ed. Mc Graw Hill Medical, 2013.
- [15] E. N. Marieb and K. N. Hoehn, “The Autonomic Nervous System,” in *Human Anatomy & Physiology*, 10th ed., Pearson, 2015, pp. 525–543.
- [16] G. J. Tortora and B. H. Derrickson, *Principles of Anatomy and Physiology*, 15th ed. Wiley, 2016.
- [17] A. Hadad and B. Alejandro, “A New Spontaneous Pupillary OscillationsBased Biometric System Approach,” in *VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014, Paraná, Argentina 29, 30 & 31 October 2014*, IFMBE Proceedings - Springer, 2015, pp. 401–405.
- [18] P. R. K. Turnbull, N. Irani, N. Lim, and J. R. Phillips, “Origins of pupillary hippus in the autonomic nervous system,” *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.*, vol. 58, no. 1, 2017.

- [19] H. K. Walker, W. D. Hall, and J. W. Hurst, "The Pupils," in *Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations.*, 3rd ed., Boston, 1990.
- [20] S. Sirois and J. Brisson, "Pupillometry," *Wiley Interdiscip. Rev. Cogn. Sci.*, vol. 5, no. 6, pp. 679–692, 2014.
- [21] J. Wang, "Pupil dilation and eye tracking," in *Handbook of Process-Tracing Methods*, P. Press, Ed. 2009, pp. 1–33.
- [22] A. C. P. Franco, "Identificação da actividade do sistema nervoso simpático e parassimpático em dados de pupilometria, utilizando a Singular Spectrum Analysis," 2013.
- [23] "Medical Expo - The Online Medical Device Exhibition." [Online]. Available: <http://www.medicalexpo.com/medical-manufacturer/pupillometer-2657.html>. [Accessed: 30-Aug-2018].
- [24] A. Q. Angulo-Chavira, O. García, and N. Arias-Trejo, "Pupil response and attention skills in Down syndrome," *Res. Dev. Disabil.*, vol. 70, no. March, pp. 40–49, 2017.
- [25] C. H. Ho and Y. N. Lu, "Can pupil size be measured to assess design products?," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 44, no. 3, pp. 436–441, 2014.
- [26] *Grande Dicionário da Língua Portuguesa*, 10/2010. Porto Editora.
- [27] R. S. Pozos and D. F. Danzl, "Human Physiological Responses to Cold Stress and Hypothermia," in *Medical Aspects of Harsh Environments, Volume 1*, 1st ed., Office of the Surgeon General, U.S. Army, 2002, pp. 351–382.
- [28] S. Heindl, J. Struck, P. Wellhöner, F. Sayk, and C. Dodt, "Effect of facial cooling and cold air inhalation on sympathetic nerve activity in men," *Respir. Physiol. Neurobiol.*, vol. 142, pp. 69–80, 2004.
- [29] S. S. Cheung, "Responses of the hands and feet to cold exposure," *Temperature*, vol. 2, pp. 105–120, 2015.
- [30] C. Tassorelli, G. Miceli, V. Osipova, F. Rossi, and G. Nappi, "Pupillary and cardiovascular responses to the cold-pressor test," *J. Auton. Nerv. Syst.*, vol. 55, no. 1, pp. 45–49, 1995.
- [31] "Virtoba." [Online]. Available: <http://www.virtoba.com/products/virtoba-v2>. [Accessed: 12-Aug-2018].
- [32] Google, "Google Cardboard - Technical Specification v2.0," 2015. [Online]. Available: <https://vr.google.com/cardboard/manufacturers/>. [Accessed: 10-Aug-2018].
- [33] W. N. Charman, "Visual Optics," in *Contact Lens Practice*, Third Edit., Elsevier, 2018, p. 28–42.e2.
- [34] "How Lenses for Virtual Reality Headsets Work." [Online]. Available: <https://vr-lens-lab.com/lenses-for-virtual-reality-headsets/>. [Accessed: 13-Aug-2018].
- [35] Omnienergy, "Specification for Lithium Battery." [Online]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/1496885.pdf>. [Accessed: 17-Aug-2018].
- [36] "BU-302: Series and Parallel Battery Configurations," *Battery University*. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations. [Accessed: 17-Aug-2018].
- [37] M. M. Doria and F. da C. Marinho, *Ondas & Bits*, 1st ed. Editora Livraria da Física, 2006.

- [38] J. Krause, *Visual Design: Ninety-five things you need to know. Told in Helvetica and Dingbats*. 2015.
- [39] G. Leal, C. Neves, and P. M. Vieira, “Pupillometry: Development of equipment for studies of autonomic nervous system,” *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 372 AICT, pp. 553–562, 2012.
- [40] W. Nowak, A. Zarowska, E. Szul-Pietrzak, and M. Misiuk-Hojło, “System and measurement method for binocular pupillometry to study pupil size variability,” *Biomed. Eng. Online*, vol. 13, no. 1, 2014.

APÊNDICE A

Neste capítulo encontram-se as séries temporais de variação do diâmetro pupilar, resultantes do processamento dos vídeos de cada um dos doze sujeitos (S_1, S_2, \dots, S_{12}) que participaram no estudo de pupilometria a estímulo frio. Encontram-se também, sobrepostos aos sinais, os parâmetros de interesse, tal como são apresentados ao utilizador.

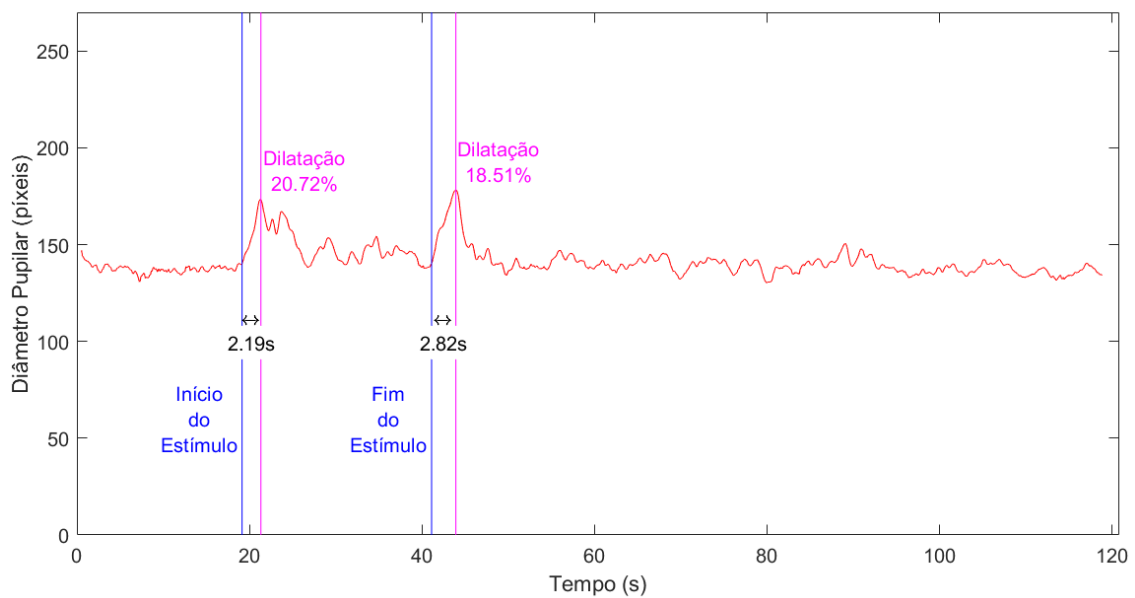


Figura A.1 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_1 .

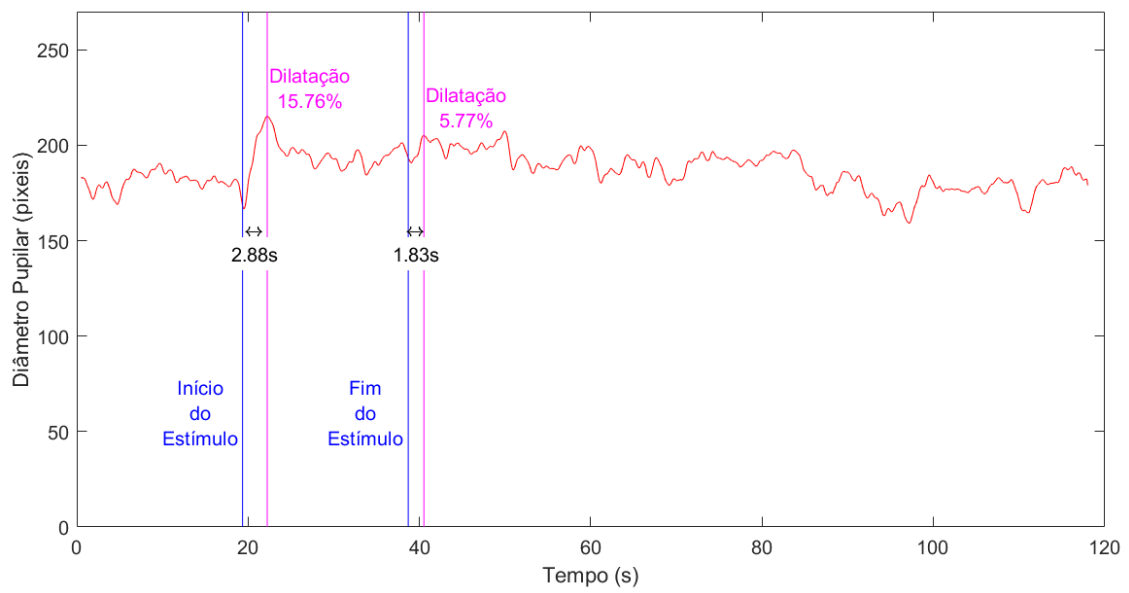


Figura A.2 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_2 .

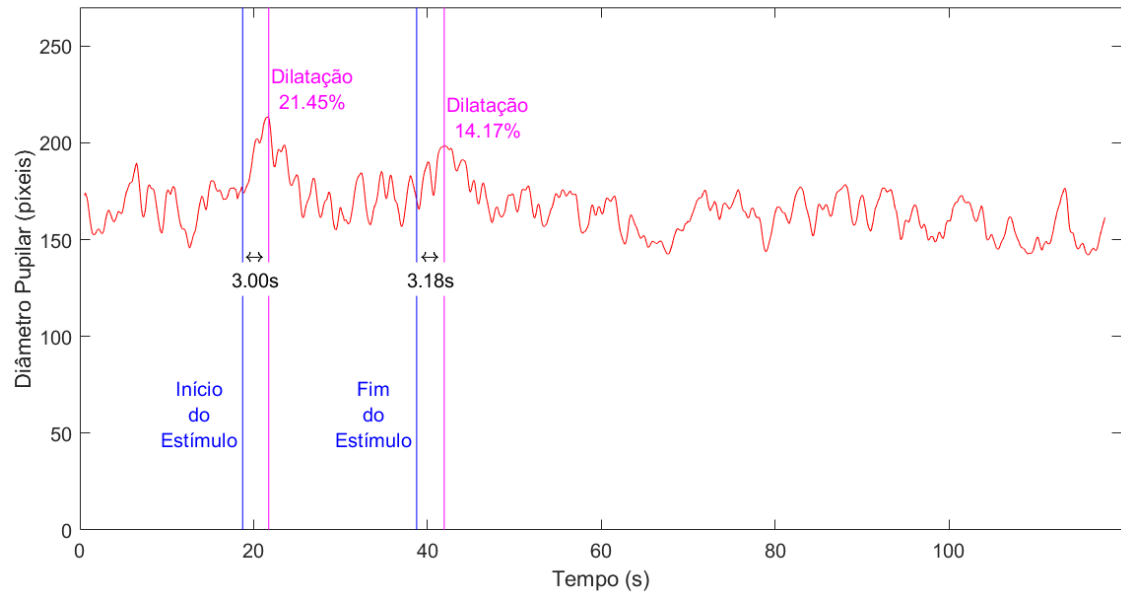


Figura A.3 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_3 .

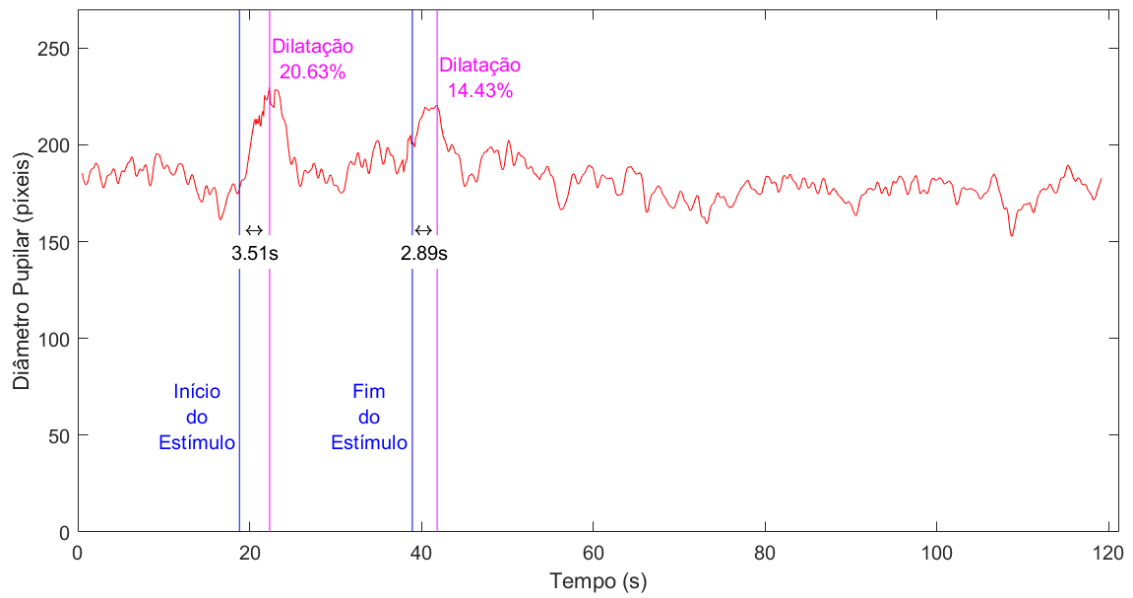


Figura A.4 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_4 .

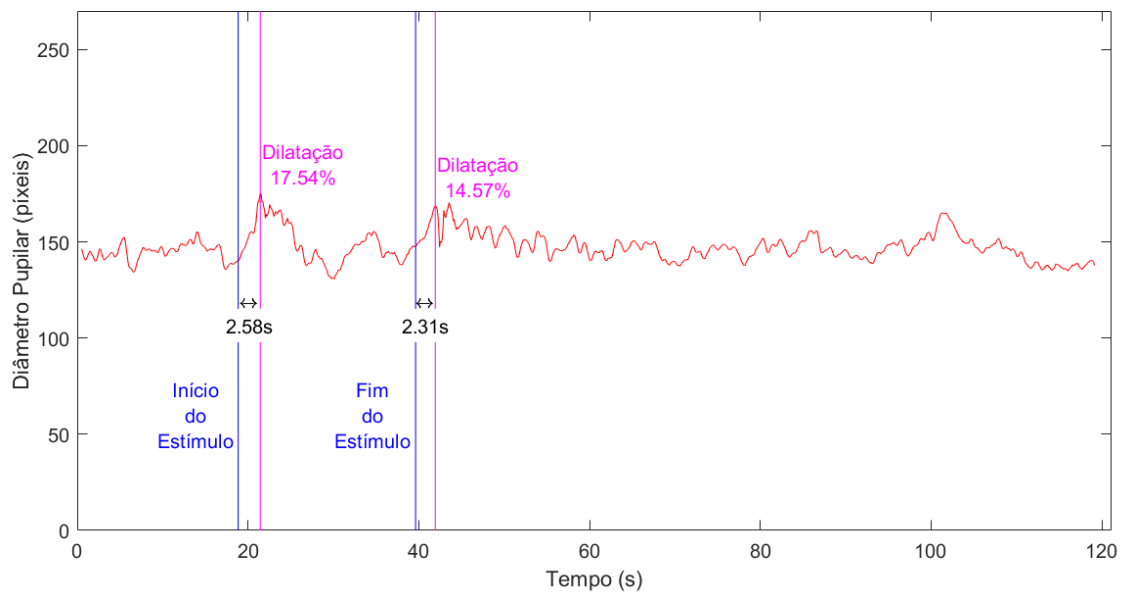


Figura A.5 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_5 .

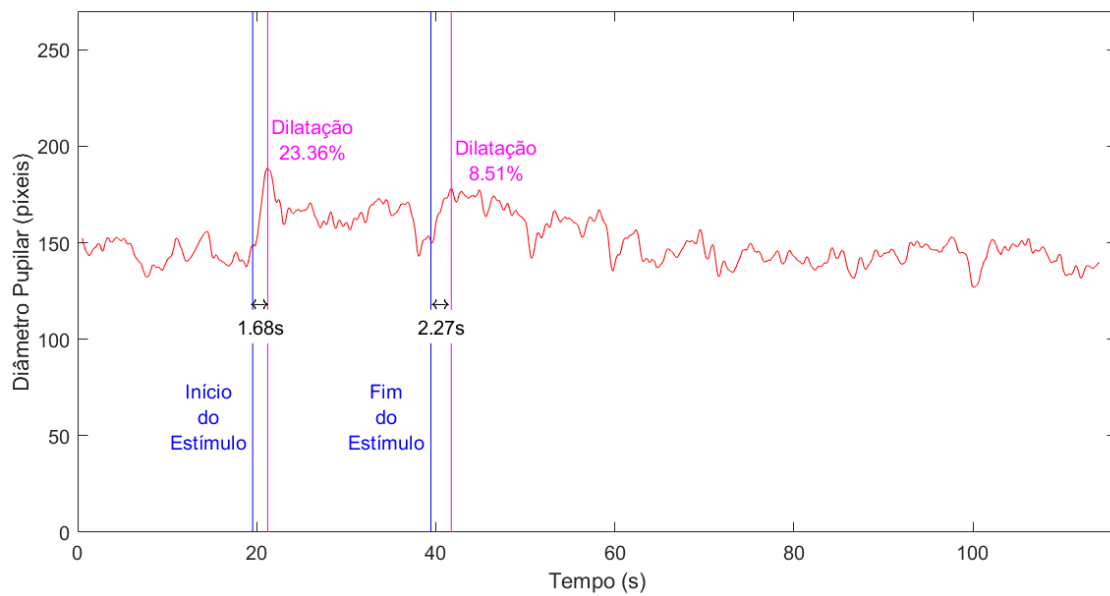


Figura A.6 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_6 .

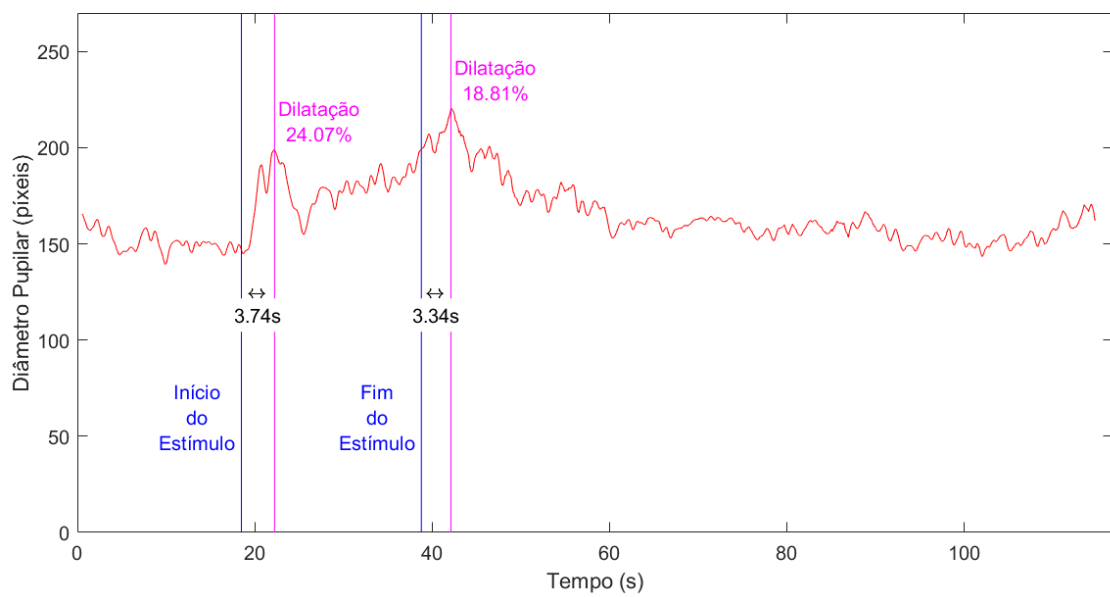


Figura 8A.7 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_7 .

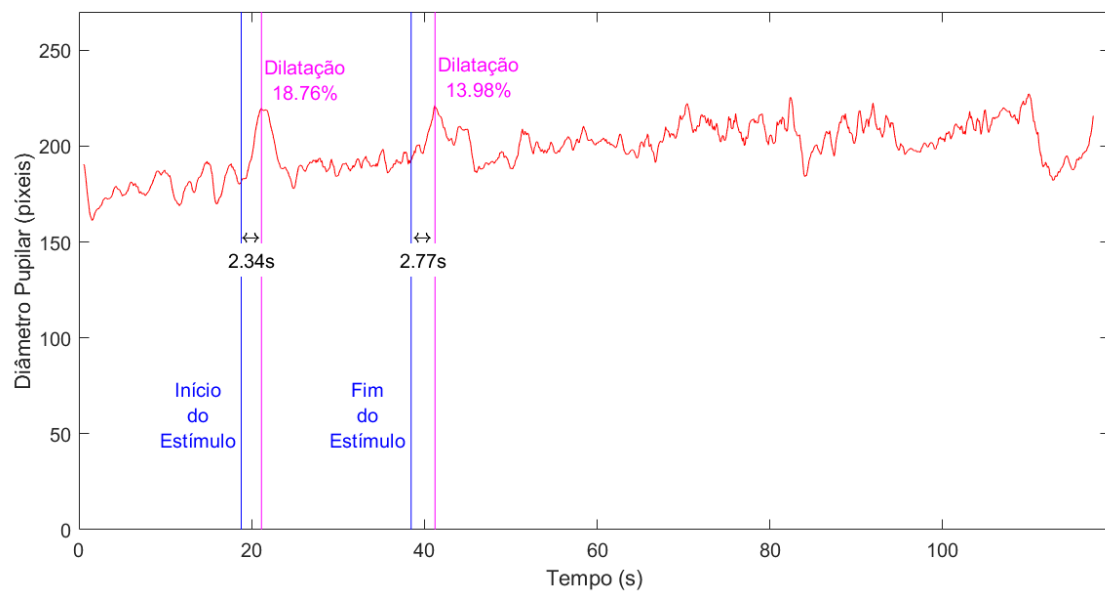


Figura A.8 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_8 .

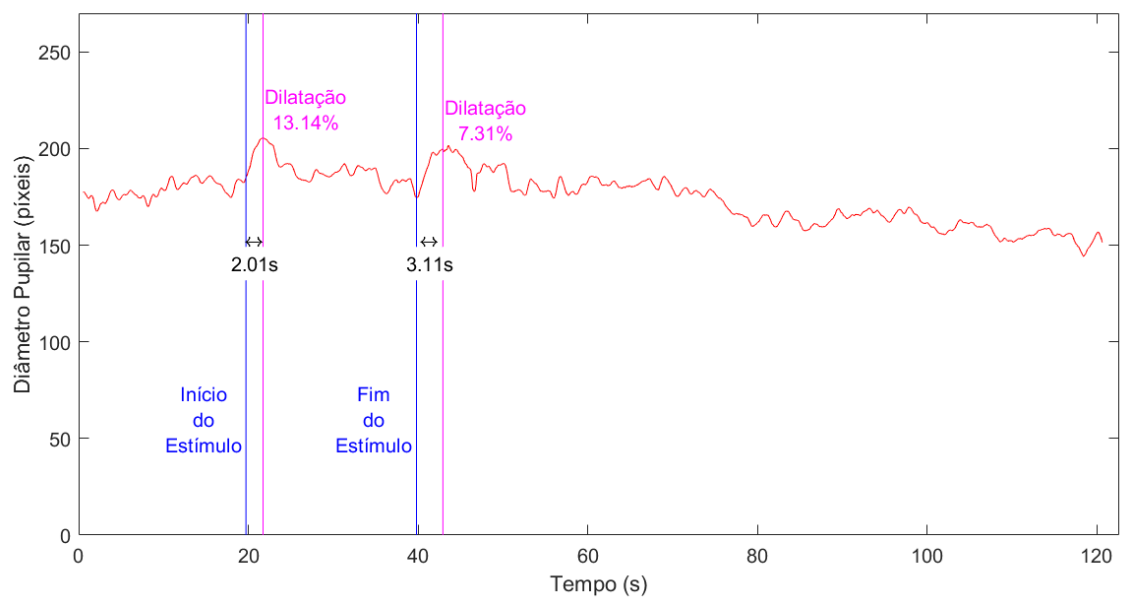


Figura A.9 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_9 .

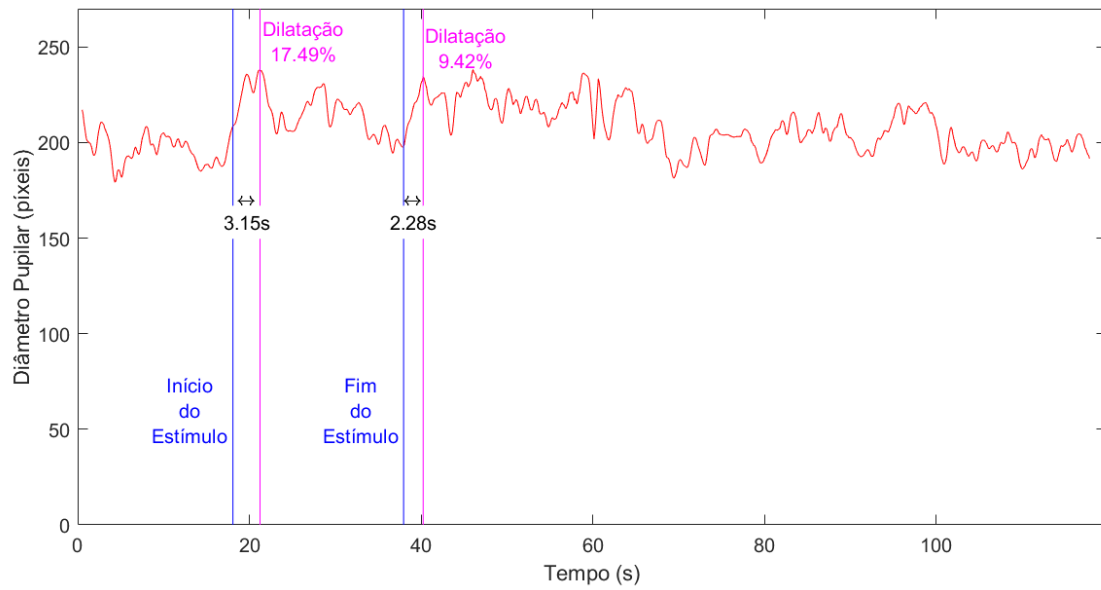


Figura A.10 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_{10} .

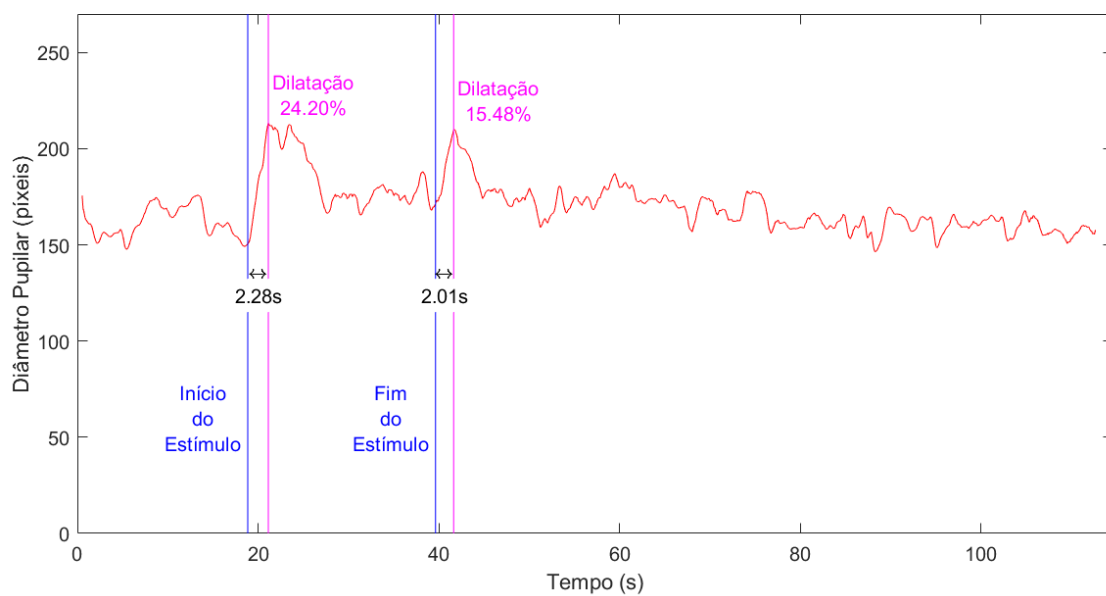


Figura A.11 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_{11} .

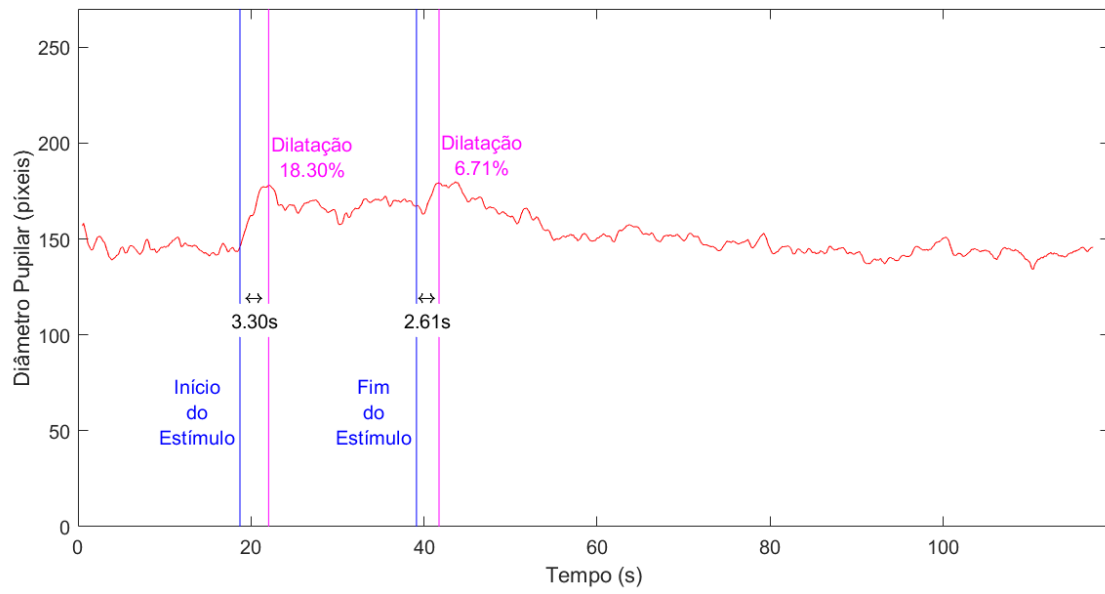


Figura A.12 - Variação do diâmetro pupilar em função do tempo e parâmetros de interesse do S_{I2} .

APÊNDICE B

Neste capítulo encontram-se os espectrogramas associados à série temporal resultante cada um dos doze sujeitos (S_1, S_2, \dots, S_{12}) que participaram no estudo de pupilometria a estímulo frio. O espectrograma encontra-se com o seu eixo das frequências ampliado até 0.35 Hz, de modo a melhor se observar as frequências dominantes. As linhas a azul representadas no espectrograma indicam o início e o fim do estímulo.

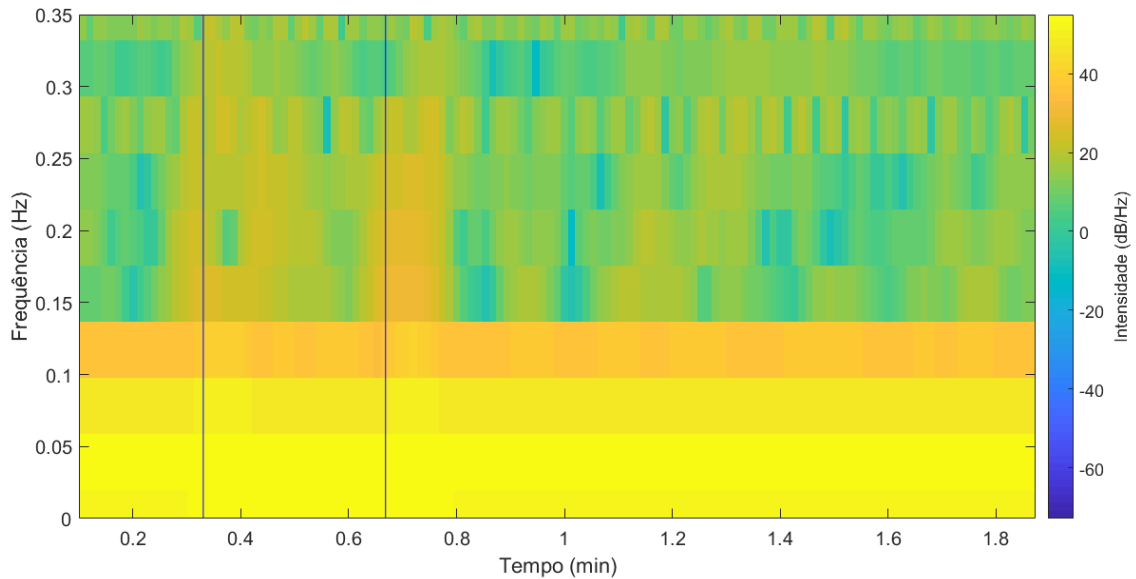


Figura B.1 - Espectrograma associado ao sinal resultante do S_1 .

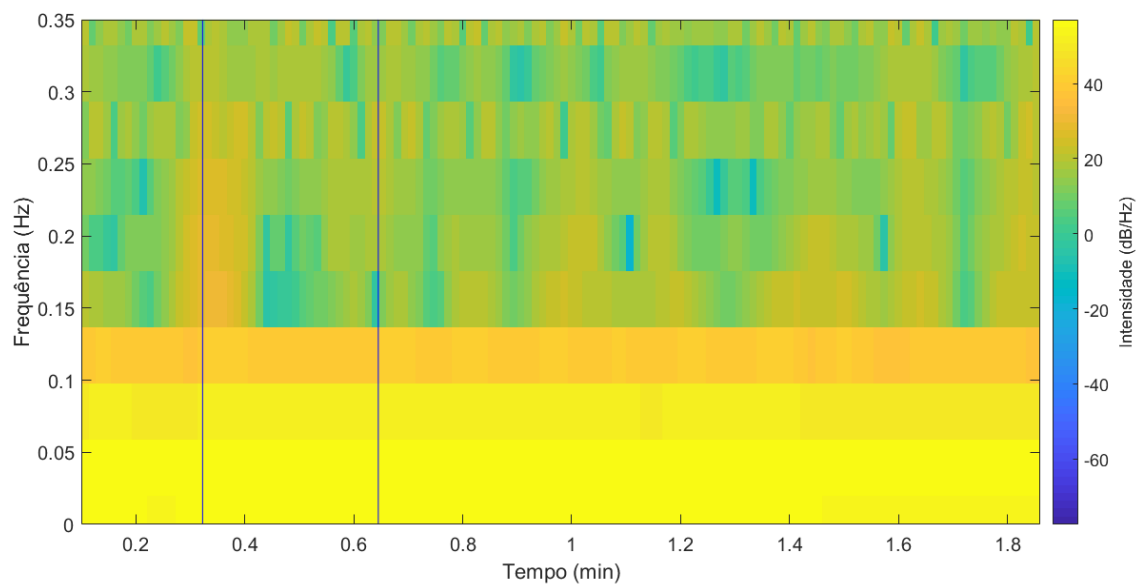


Figura B.2 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_2 .

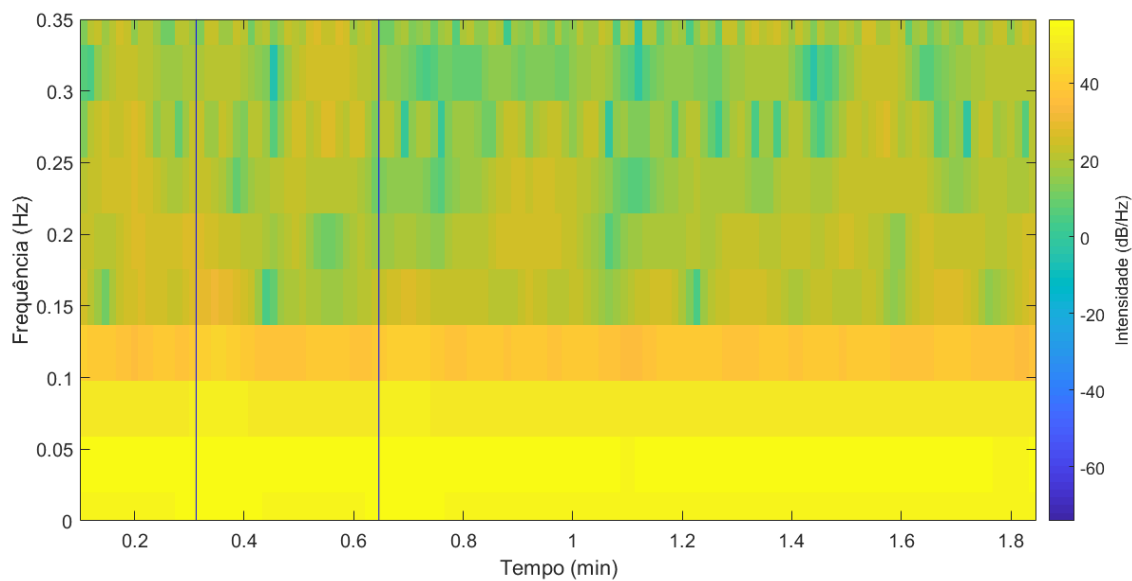


Figura B.3 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_3 .

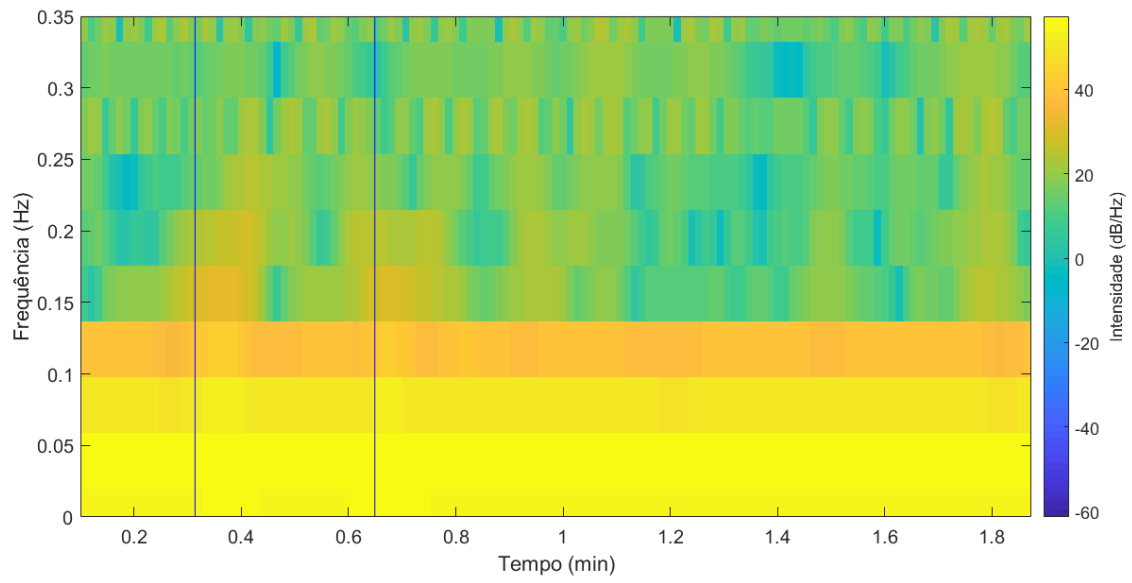


Figura B.4 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_4 .

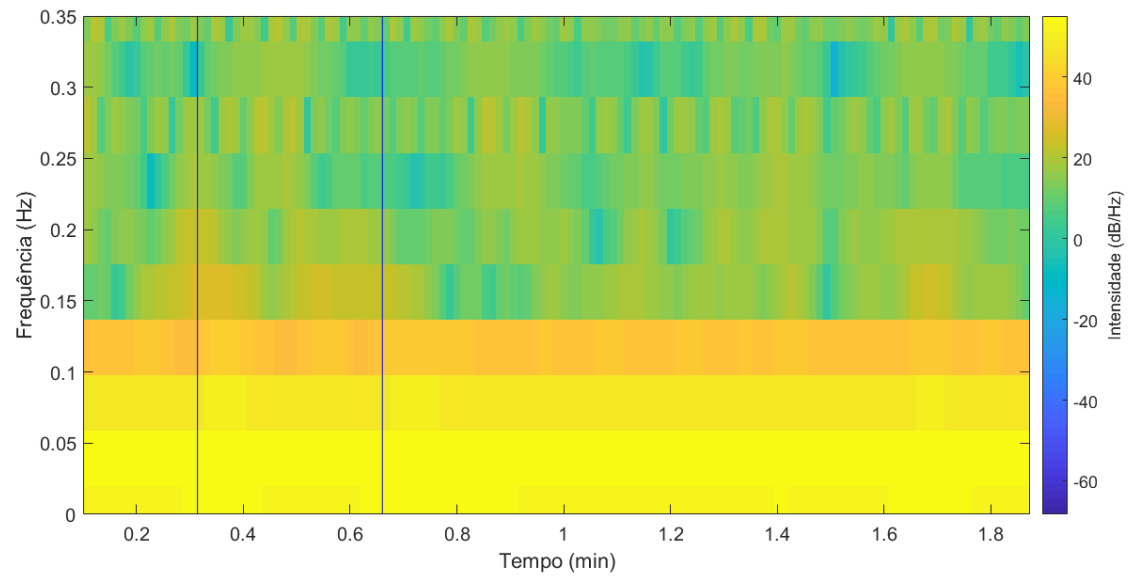


Figura B.5 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_5 .

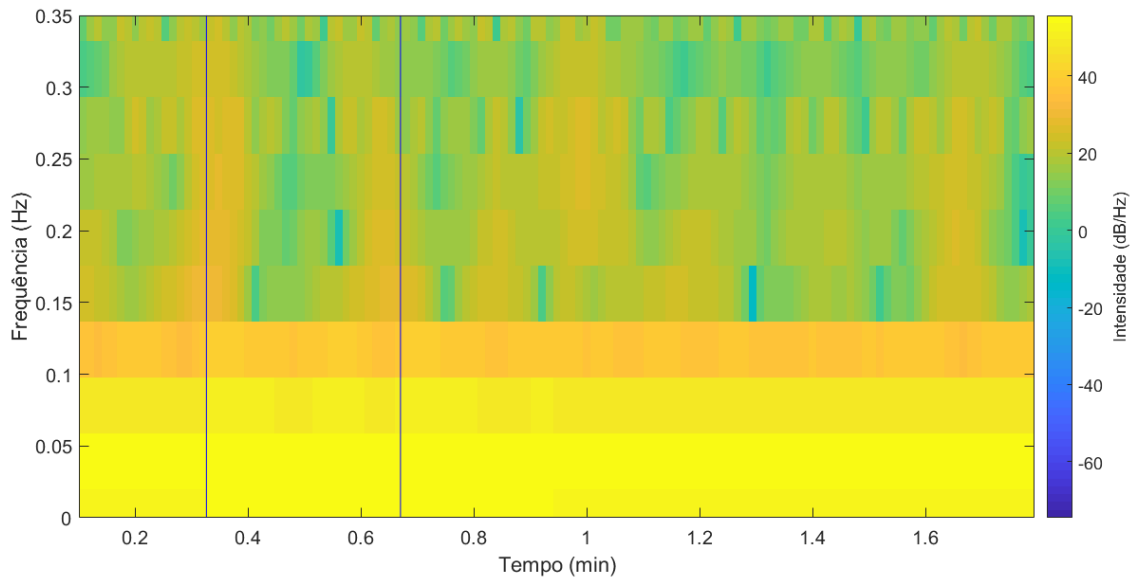


Figura B.6 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_6 .

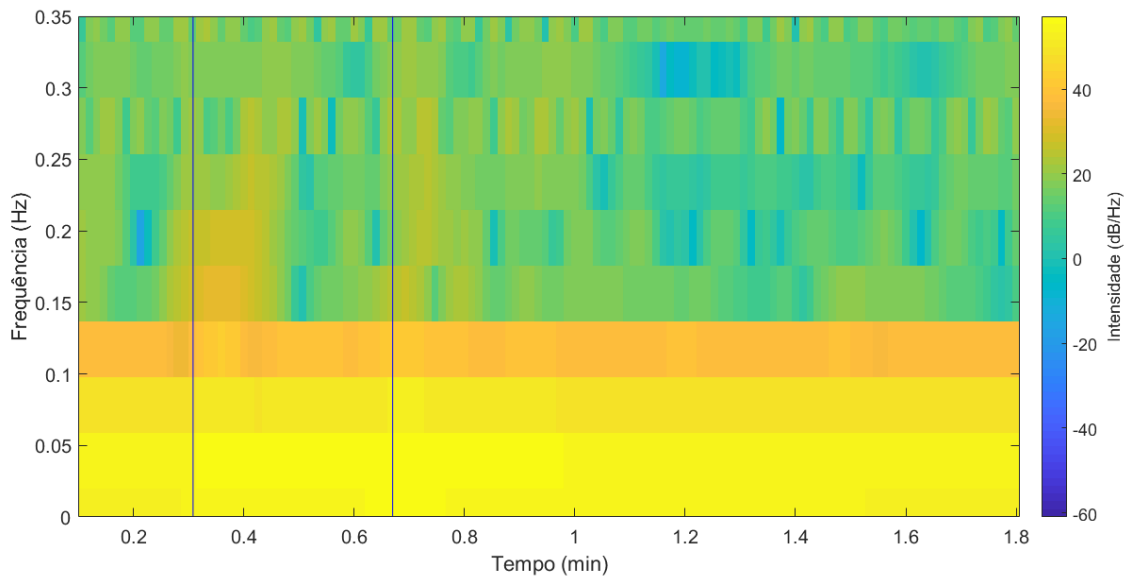


Figura B.7 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_7 .

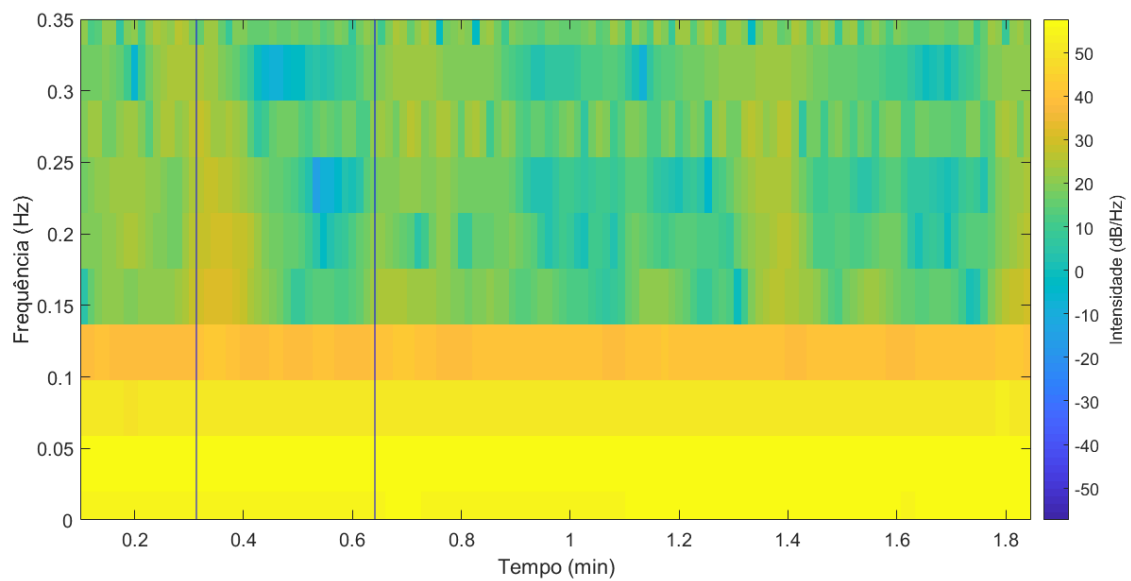


Figura B.8 - Espectrograma associado ao sinal resultante do S_8 .

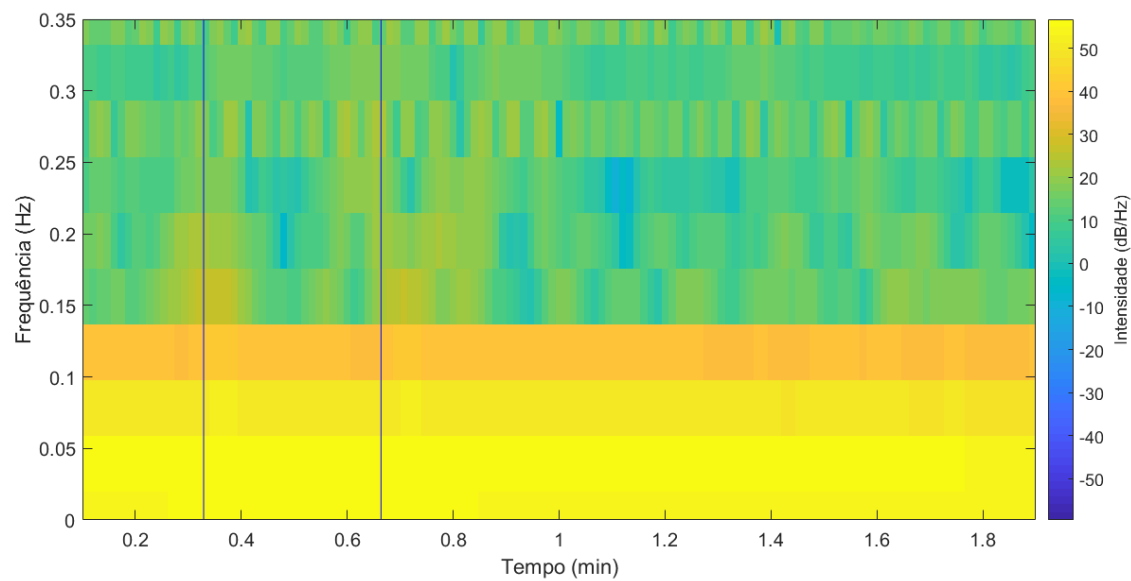


Figura B.9 - Espectrograma associado ao sinal resultante do S_9 .

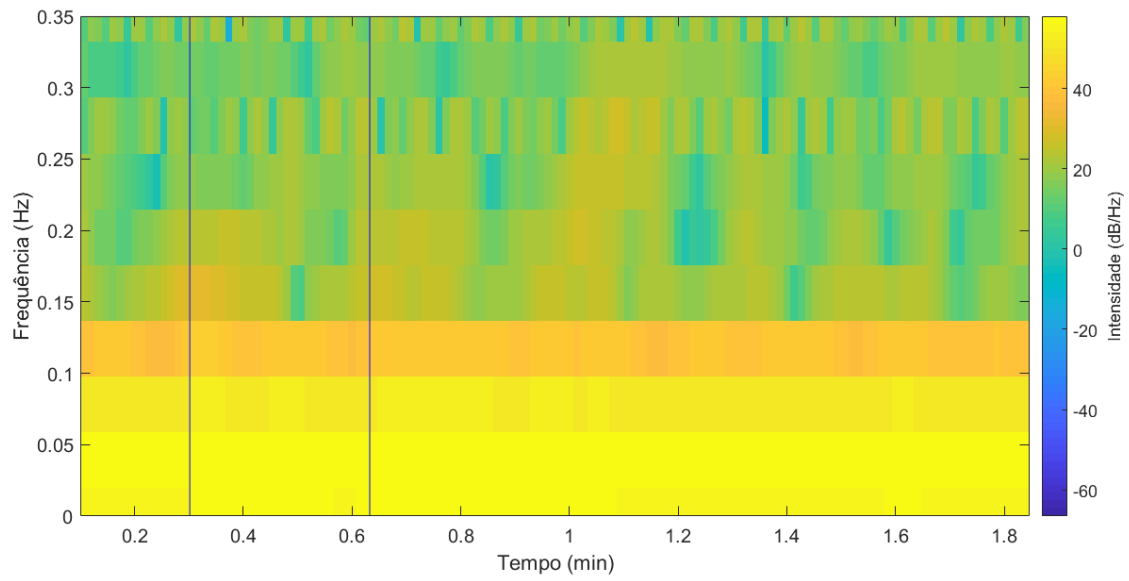


Figura B.10 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_{10} .

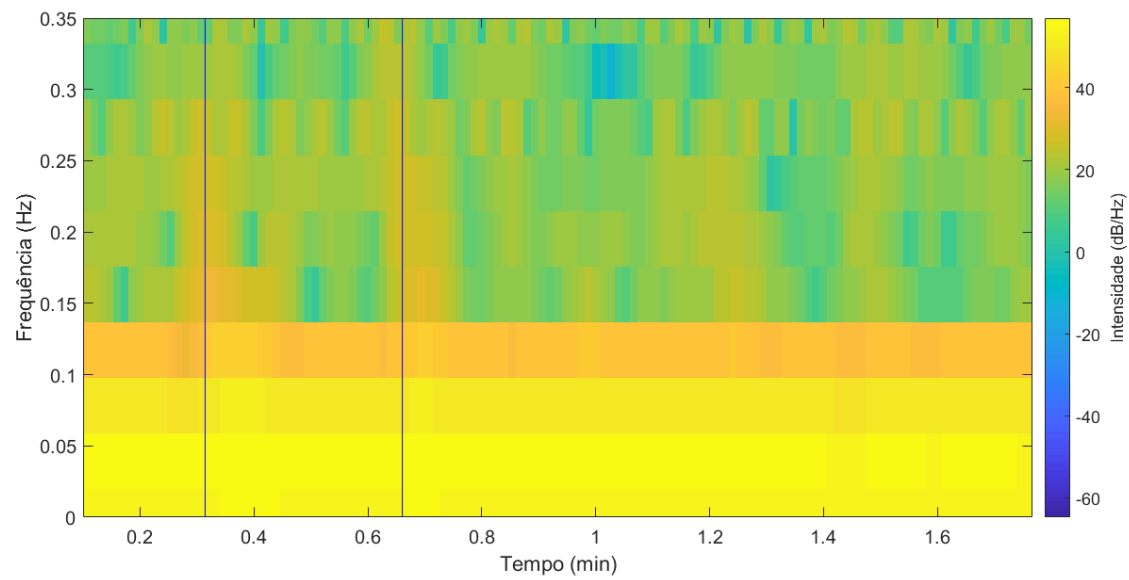


Figura B.11 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_{11} .

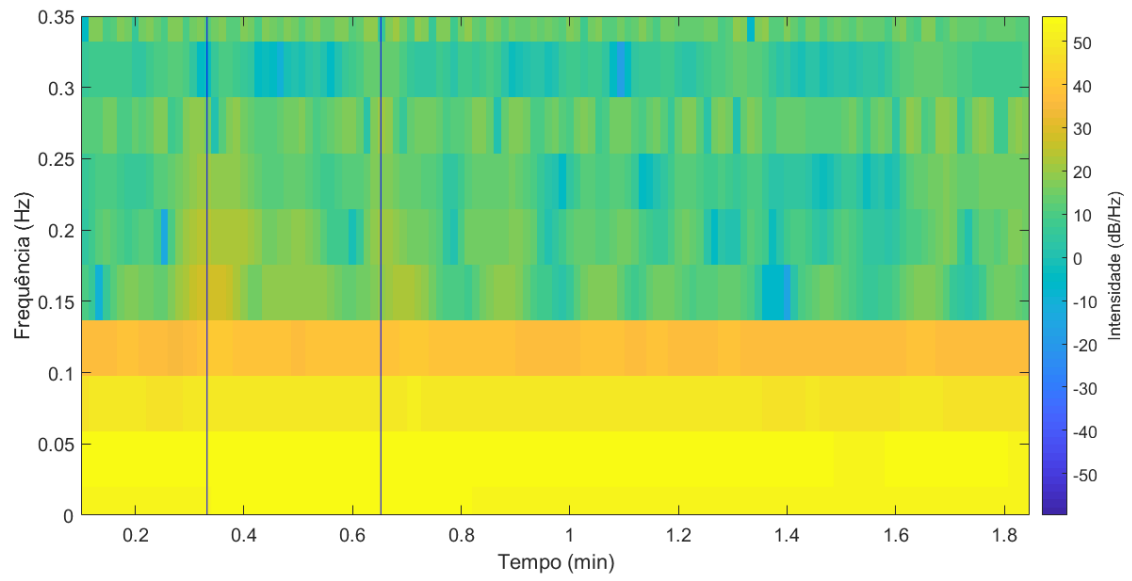


Figura B.12 - Espetrograma associado ao sinal resultante do S_{I_2} .